UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI “ROMA TRE”

Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

Dottorato in Geodinamica

Ciclo XXI

triennio 2005/2008

PERICOLOSITÀ GEOLOGICA E CARATTERIZZAZIONE DEL SOTTOSUOLO IN AMBIENTE URBANO: METODOLOGIE DI ANALISI ED APPLICAZIONI AL CASO DI ROMA

Relatore
Prof. Renato Funiciello

Correlatore
Prof.ssa Rossella Nocera

Coordinatore del Dottorato
Prof. Domenico Cosentino

Candidata
Giorgia Urru

Referi
Prof. Mattia Crespi
Dott. Guido Giordano

Sommario

1. PREMESSA…… 1

PARTE PRIMA

2. LA PERICOLOSITÀ GEOLOGICA NELLE AREE URBANE……...3

2.1 L'INCREMENTO DEMOGRAFICO, IL PROCESSO DI URBANIZZAZIONE E I RISCHI NATURALI……...3

2.2 LE AREE URBANE E I RISCHI NATURALI……7

2.3 LE PERICOLOSITÀ GEOLOGICHE NELLA CITTÀ DI ROMA…….22

2.3.1. Urbanizzazione e condizioni geologiche…….....22

2.3.2 I terreni di riporto…….29

2.3.3 Pericolosità sismica……..33

2.3.3.1 *Fenomeni di amplificazione sismica*……..35

2.3.4 Pericolo di crollo per cavità antropiche…….....37

2.3.5 Pericolosità idrogeologica……39

2.3.6 Pericolosità di subsidenza geotecnica e cedimenti…….....…41

2.3.7 Rischio vulcanico e Gas Hazard……...42

2.4 PERICOLOSITÀ GEOLOGICA ED ISTITUZIONI……44

3. METODOLOGIA……....……....46

3.1 LE BANCHE DATI TERRITORIALI E I SISTEMI INFORMATIVI GEOGRAFICI……..49

4. IL MODELLO DELLA REALTÀ……...57

4.2 LA STRUTTURA DEI DATI DEL SOTTOSUOLO……..61

4.2.1 Le entità……63

4.2.2 Le relazioni……..…….81

4.2.3 Le Interrogazioni……..86

4.3 IL MODELLO LOGICO E L'AMBIENTE GIS……..……...89

4.4 MODELLO FISICO E L'INSERIMENTO DEI DATI……...…100

4.4.1 Eterogeneità e complessità dei dati raccolti…….……101

4.4.1.1 Dati di sondaggio……...103
4.4.1.2 Dati sulla geologia di superficie……....105
4.4.1.3 Dati topografici storici..……....106
4.4.1.4 Dati topografici attuali……106
4.4.1.5 Dati sulle cavità……...106
4.4.1.6 Dati sull'urbanizzato……...…107

4.4.2 Il sistema di riferimento e la proiezione cartografica……...……107
4.4.2.1 Problemi di georeferenziazione……...109

PARTE SECONDA

5. APPLICAZIONI……112

5.1 PERICOLOSITÀ GEOTECNICA SISMICA E MICROZONAZIONE……..117

6.INQUADRAMENTO GEOLOGICO…….……..……...122

6.1 EVOLUZIONE PALEOGEOGRAFIA ED EUSTATISMO……..……124

6.2 IL VULCANISMO LAZIALE…….……129

6.3 STRATIGRAFIA…….....133

6.3.1 UNITÀ PRE-VULCANICHE DI AMBIENTE MARINO……...135

6.3.2 UNITÀ PREVULCANICHE DI AMBIENTE CONTINENTALE……...……..136

6.3.3 UNITÀ VULCANICHE, SINVULCANICHE E VULCANOCLASTICHE…….....138

6.3.4 UNITÀ ALLUVIONALI E DEPOSITI RECENTI……141

7. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO ED IDROGEOLOGICO ……143

7.1 CENNI SULL'ASSETTO IDROGEOLOGICO……..145

8. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO-TECNICA DELLE PRINCIPALI UNITÀ LITOTECNICHE……148

8.1 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DELLE UNITÀ PRE-VULCANICHE……..…148

8.2 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DELLE PRINCIPALI UNITÀ VULCANICHE……..149

8.3 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DELLE ALLUVIONI OLOCENICHE……....151

8.3.1 Depositi alluvionali della valle del Tevere…….151

8.3.2 Depositi alluvionale dei Fossi……153

9. CASE HISTORIES…….154

9.1 IL FOSSO DELLE ACQUE MARIANE (PORTA METRONIA)……....156

9.1.1 Morfologia e cartografia storica…….…159

9.1.2 Informazioni del sottosuolo……....161

9.1.2.1 La scelta del modello digitale del suolo…….163

9.1.2.2 I dati stratigrafici……...170

9.1.2.3 I dati geotecnici…….…….…172

9.1.2.3 I dati piezometrici…….…….175

9.1.3 Interpretazione stratigrafica……176

9.1.3.1 Ricostruzioni delle superfici stratigrafiche……..…….181

9.1.4 Caratterizzazione dinamica dei terreni…….……...……185

9.2 IL FOSSO DI GROTTA PERFETTA……..……190

9.2.1 Morfologia e cartografia storica…….……..191

9.2.2 Informazioni del sottosuolo…….193

9.2.2.1 Dati ed interpretazione stratigrafica……..194

9.2.2.2 Caratterizzazione geotecnica in condizioni statiche…….…….200

9.2.3.3 Caratterizzazione geotecnica in condizioni dinamiche…….….203

PARTE TERZA

10. DISCUSSIONE……..……207

10.1 LA MODELLIZZAZIONE DELLA REALTÀ E IL SISTEMA INFORMATIVO GEOGRAFICO ……..207

10.1.1 Il progetto sviluppato e le istituzioni…….210

10.2 LA RISPOSTA DINAMICA DEI TERRENI ALLUVIONALI IN RIVA SINISTRA……212

10.3 I DUE FOSSI A CONFRONTO: CONSIDERAZIONI GEOLOGICHE, GEOTECNICHE E LA PERICOLOSITÀ INCIDENTE SUL TERRITORIO STUDIATO……...…217

11. APPLICAZIONE IN WEBGIS……225

11.1 Mapserver…….225

11.2 L'applicativo su Roma: il progetto di Dottorato……...226

12. CONCLUSIONI……236

12.1 PRINCIPALI RISULTATI OTTENUTI……..…236

10.2 LIMITI E POTENZIALITÀ DELLA METODOLOGIA PROPOSTA: SVILUPPI FUTURI……..239

BIBLIOGRAFIA……..i

APPENDICE I……...…I

APPENDICE II……...…..III

1. PREMESSA

Le aree urbane costituiscono per definizione la parte più densamente popolata del pianeta, ospitando circa la metà della popolazione mondiale. Nell'ultimo secolo, inesorabilmente e molto rapidamente, le aree urbane hanno esteso i loro confini ben oltre i centri storici cittadini per rispondere alle esigenze dettate dall'incremento demografico. Tale realtà comporta implicazioni non solo socio-economiche, ma crea nuove problematiche ambientali e nuove pericolosità che le amministrazioni locali devono sempre più prontamente affrontare. In questa ottica lo studio e la ricerca su vari aspetti e criticità connesse alla pericolosità geologica in senso lato diventano di essenziale ausilio al lavoro di prevenzione e mitigazione degli eventi naturali durante la pianificazione territoriale.

Da diversi decenni si moltiplicano gli studi relativi alla valutazione dei fattori di pericolosità geologica incidenti sulle maggiori aree metropolitane italiane e del mondo, diventando un tema fondamentale per un corretto approccio agli interventi e alla gestione del territorio.

In tale contesto si inserisce il progetto descritto in questa Tesi di Dottorato, nel quale lo studio della pericolosità geologica in ambito urbano è stato affrontato in modo multidisciplinare ed integrato. Il duplice obiettivo del presente Progetto di Ricerca si compone: (i) della definizione concettuale dei parametri che permettono di valutare le differenti pericolosità geologiche presenti in aree di urbanizzazione secolare, e (ii) della proposta di uno schema logico di relazioni che permettano di estrarre informazioni utili a delineare un quadro geologico-geotecnico organico e completo rispetto alla tipologia di pericolosità da investigare.

La tesi si sviluppa in tre parti. La prima parte illustra la fase metodologica, con la definizione degli strumenti utili allo studio della pericolosità geologica; la seconda parte presenta le applicazioni finalizzate alla validazione della metodologia proposta e alle possibilità di analisi; infine, la terza parte raccoglie e riassume i risultati ottenuti, valutando limiti e potenzialità della metodologia.

Nella parte metodologica vengono descritti i concetti fondamentali che hanno condotto dapprima all'ideazione e poi alla costruzione ed implementazione di un sistema informativo territoriale in grado di raccogliere, gestire ed elaborare le principali informazioni geologico-geotecniche derivanti da indagini del sottosuolo, da rilevamenti di superficie e da restituzioni cartografiche.

In seguito, si è validato il sistema informativo attraverso la sua applicazione al contesto urbano della città di Roma, la quale costituisce un eccellente banco di prova per testare la bontà del percorso intrapreso. La sua storia millenaria così strettamente connessa alla sua peculiare storia geologica, il suo sviluppo urbano intermittente, con periodi di forte espansione demografica-territoriale e con lunghi periodi di stasi e ridimensionamento, le molteplici pericolosità che insistono sul suo territorio e le nuove esigenze trasportistiche a cui la città è chiamata, fanno sì che le nuove sfide ingegneristiche necessitino sempre più di una maggiore comprensione, valutazione e dettaglio dal punto di vista geologico.

Per esemplificare il contributo del *geodatabase* progettato allo studio della pericolosità geologica sono state scelte due paleovalle, oggi sepolte dalla coltre dei terreni di riporto ed intensamente urbanizzate: la paleovalle del Fosso delle Acque Mariane in prossimità del Centro Storico, e la paleovalle corrispondente al Fosso di Grotta Perfetta, area di recente espansione, entrambe alla sinistra idrografica del Fiume Tevere dominata durante l'Olocene da una sedimentazione fluviale arricchita dagli apporti di materiale vulcanico e vulcanoclastico del complesso Vulcano Laziale (De Benedetti *et alii* 2008) e di materia organica (Campolunghi *et alii* 2006). I due Fossi sono sostanzialmente differenti per sviluppo urbanistico sia nei tempi sia nelle tipologia dei riporti, delle costruzioni e delle infrastrutture, nonché sono suscettibili con grado di intensità variabile a diverse pericolosità geologiche.

Le potenzialità e la versatilità del progetto sono state messe in evidenza attraverso lo sviluppo di una applicazione *WebGis* con il *software Open Source* MapServer (Università del Minnesota). Si è sostanzialmente costruita una pagina web elementare in cui si sono inseriti i risultati del progetto sopra descritto in forma di mappa, ma navigabile ed interattiva. Le informazioni messe su una piattaforma *WebGis* diventano fruibili in modo semplice anche da non professionisti del settore e sono liberamente consultabili ed allo stesso tempo protette nella loro riservatezza.

Durante la fase operativa sono emersi sia i punti di forza sia i limiti della metodologia utilizzata, laddove la qualità dei dati, il tempo e le risorse umane si sono rivelati i fattori chiave per l'ottimizzazione del prodotto finale.

PARTE PRIMA

2. LA PERICOLOSITÀ GEOLOGICA NELLE AREE URBANE

Le aree urbane e il processo di urbanizzazione costituiscono il più importante e significativo processo di trasformazione del territorio. L'evoluzione della città dal Medioevo ai giorni nostri conseguente ai cambiamenti socio-economici e all'incremento demografico, ha influenzato notevolmente l'evoluzione del paesaggio naturale.

Il progressivo abbandono delle attività agro-forestali e delle aree rurali ha avuto inizio a partire dall'epoca industriale, un vero e proprio esodo verso le città e prosegue ancora oggi nei Paesi in via di sviluppo. Tale incremento di popolazione ha determinato il rapido sviluppo territoriale delle aree urbane dove ormai vivono circa 3 miliardi di persone nel mondo ossia circa la metà della popolazione globale. A causa dell'urbanizzazione l'equilibrio tra attività umana ed ambiente naturale viene seriamente compromesso (De Mulder 1996).

Oltre alle problematiche socio-economiche e culturali create dall'espansione dei centri urbani contestualmente alla concentrazione della popolazione in queste aree, si sono definite nuove problematiche ambientali e nuove pericolosità intrinsecamente connesse con l'attività umana.

2.1 L'INCREMENTO DEMOGRAFICO, IL PROCESSO DI URBANIZZAZIONE E I RISCHI NATURALI

L'UNPFA, organismo internazionale delle Nazioni Unite che si occupa dell'aspetto demografico mondiale, predice che nel 2050 la popolazione del pianeta raggiungerà i 9.1 miliardi e che il 60 % vivrà nelle aree urbane.

Nel 1800 solo 2 persone su 100 vivevano in città, agli inizi del XX secolo 15 su 100 ed ora circa la metà della popolazione è urbana. Dal 1960 al 1999 la percentuale di popolazione globale che vive in città è passata dal 33 % al 47 %. Nei Paesi sviluppati circa il 76 % della popolazione è urbana, mentre il 40 % degli abitanti delle aree in via di sviluppo risiede in aree urbane (Population Reference Bureau, 2001). Ad ogni modo l'urbanizzazione dei Paesi meno sviluppati sta avvenendo rapidamente e negli ultimi 50 anni ha visto in questi Paesi un tasso di crescita senza precedenti. Si prevede che nel 2030 il 60% della popolazione mondiale vivrà in aree urbane e che la maggior crescita sarà proprio nelle città

dei Paesi meno sviluppati (Fig. 1). L'incremento della popolazione mondiale va di pari passo con la crescita delle aree urbanizzate. Se nel 1950 vi erano solo 8 città con più di 5 milioni di abitanti e solo 1 con più di 10 milioni, nel 2015 si prevede che le *megacities* saranno 59, di cui 23 con più di 10 milioni di abitanti e 48 nei Paesi in via di sviluppo. Nel 2015 le 5 megalopoli maggiori avranno più di 20 milioni di abitanti con punte di oltre 26 milioni (dati UNFPA 2007, Tabella 1).

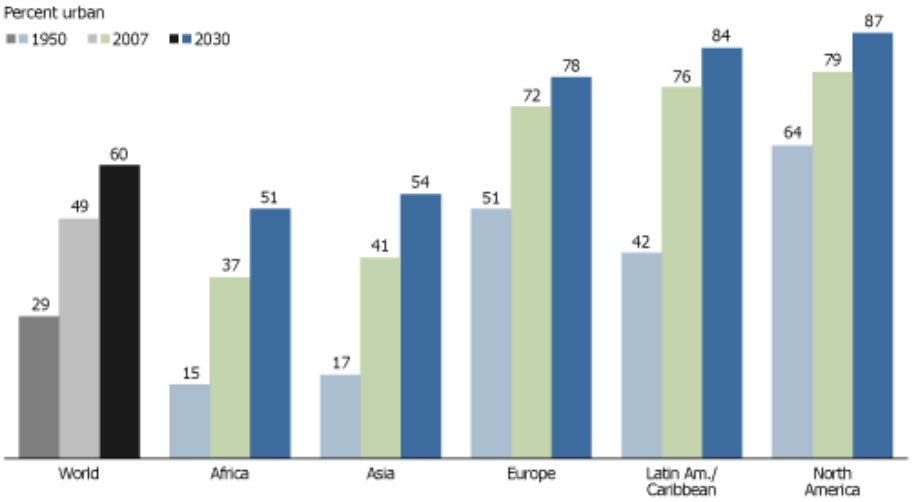


Figura 1: Attualmente, il livello di urbanizzazione è assai differente nei diversi continenti. Nei Paesi sviluppati e In America Latina – Carabi, oltre il 70 % della popolazione è urbana, mentre in Africa ed in Asia la quota di popolazione urbana è intorno al 40 %. Per il 2030 per questi due continenti si prevede che la popolazione urbana supererà il 50 % e che circa il 60 % della popolazione mondiale vivrà nelle aree urbane (Population Reference Bureau, PRB 2001)

1950		2000		2015	
1. New York, USA	12.3	1. Tokyo, Japan	26.4	1. Tokyo, Japan	26.4
2. London, England	8.7	2. Mexico City, Mexico	18.4	2. Bombay, India	26.1
3. Tokyo, Japan	6.9	3. Bombay, India	18.0	3. Lagos, Nigeria	23.2
4. Paris, France	5.4	4. São Paulo, Brazil	17.8	4. Dhaka, Bangladesh	21.1
5. Moscow, Russia	5.4	5. New York, USA	16.6	5. São Paulo, Brazil	20.4
6. Shanghai, China	5.3	6. Lagos, Nigeria	13.4	6. Karachi, Pakistan	19.2
7. Essen, Germany	5.3	7. Los Angeles, USA	13.1	7. Mexico City, Mexico	19.2
8. Buenos Aires, Argentina	5.0	8. Calcutta, India	12.9	8. New York, USA	17.4
9. Chicago, USA	4.9	9. Shanghai, China	12.9	9. Jakarta, Indonesia	17.3
10. Calcutta, India	4.4	10. Buenos Aires, Argentina	12.6	10. Calcutta, India	17.3

Tabella 1: I 10 più popolosi agglomerati urbani nel 1950, 2000 e 20015; da United Nations, *World Urbanization Prospects, The 1999 Revision*

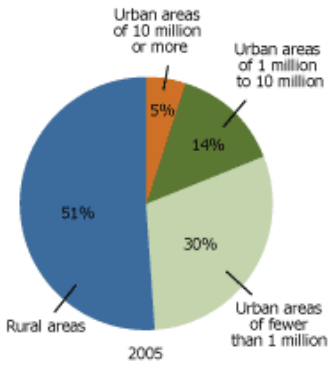
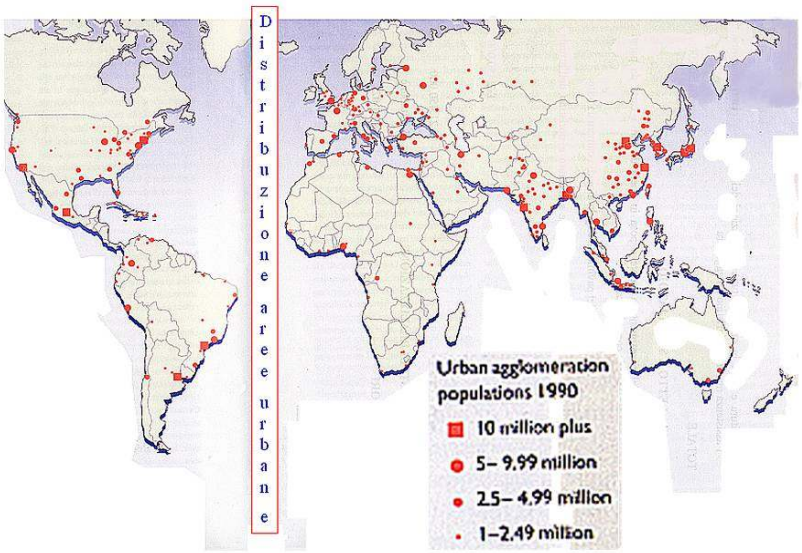


Figura 2: Distribuzione della popolazione mondiale in aree urbane e rurali (Dati UNPFA, 2005). Mentre poco più del 9 % dei cittadini urbani vive in città di 10 milioni e più di persone, circa il 62 % risiede in città di 1 milione e poco meno unità. Di questo 62 %, circa il 52 % vive in città con meno di 500,000 residenti



a.

Distribuzione mondiale della popolazione in aree urbane e rurali

Region	Total population (millions of inhabitants)	% of the world's: Total population	Rural population	Urban population	Population in 'million-cities'	No. of the world's 'Million-cities'	'Mega-cities'
World	5,285	100.0	100.0	100.0	100.0	281	12
Africa	633	12.0	14.4	8.8	7.5	25	0
Asia	3,186	60.3	72.2	44.5	45.6	118	7
Europe	722	13.7	6.7	22.8	17.9	61	0
Latin America and the Caribbean	440	8.3	4.2	13.8	14.7	36	3
North America	278	5.3	2.3	9.2	13.1	36	2
Oceania	26	0.5	0.3	0.8	1.3	5	0

b.

Figura 3: a. Distribuzione mondiale delle aree urbane nel 1990; **b.** Tabella delle proporzioni della popolazione mondiale così come vivono in aree urbane e rurali, nonché il numero di *megacities* e *million-cities* nelle diverse macrozone demografiche del mondo, dati riferiti al 1990.

Tra i vari continenti l'Europa è quello più urbanizzato, con una superficie occupata dalle aree urbane del 20 % in cui vive il 75 % della popolazione. Il Nord America, terzo continente per estensione e quarto per popolazione, possiede il 74 % di abitanti nelle città. In Asia dove risiede il 60 % della popolazione mondiale, ha una percentuale del 48 di abitanti in aree urbane.

Il processo di urbanizzazione in senso moderno che ha interessato dapprima i Paesi Occidentali ed ora in modo travolgente anche i Paesi meno sviluppati, è legato strettamente allo sviluppo demografico, economico e tecnologico. Nelle città si creano le maggiori opportunità di lavoro, i trasporti agevolano e velocizzano i collegamenti tra le varie parti della città e si concentrano le maggiori potenzialità di crescita economica e culturale della società. Di contro la città crea forti divari economici e povertà, modificazioni ambientali ed inquinamento ed esacerba la richiesta di risorse. Le città moderne tendono a diventare megalopoli e la presenza di milioni di abitanti incide in modo significativo sul sistema ambiente-territorio. Esse hanno dei bisogni ben precisi che pongono l'uomo in una sfida continua. Il processo di espansione dell'ambiente urbano negli ultimi 30 anni ha prodotto un rapido sviluppo spaziale dei centri urbani (Fig. 4), una richiesta sempre maggiore di energia, di acqua e di condizioni ambientali favorevoli all'insediamento. Per crescere la città ha bisogno di condizioni socio-politiche stabili, di sicurezza e salvaguardia sanitaria, di prosperità economica e culturale, ma soprattutto di un territorio con condizioni climatiche ed ambientali idonee.

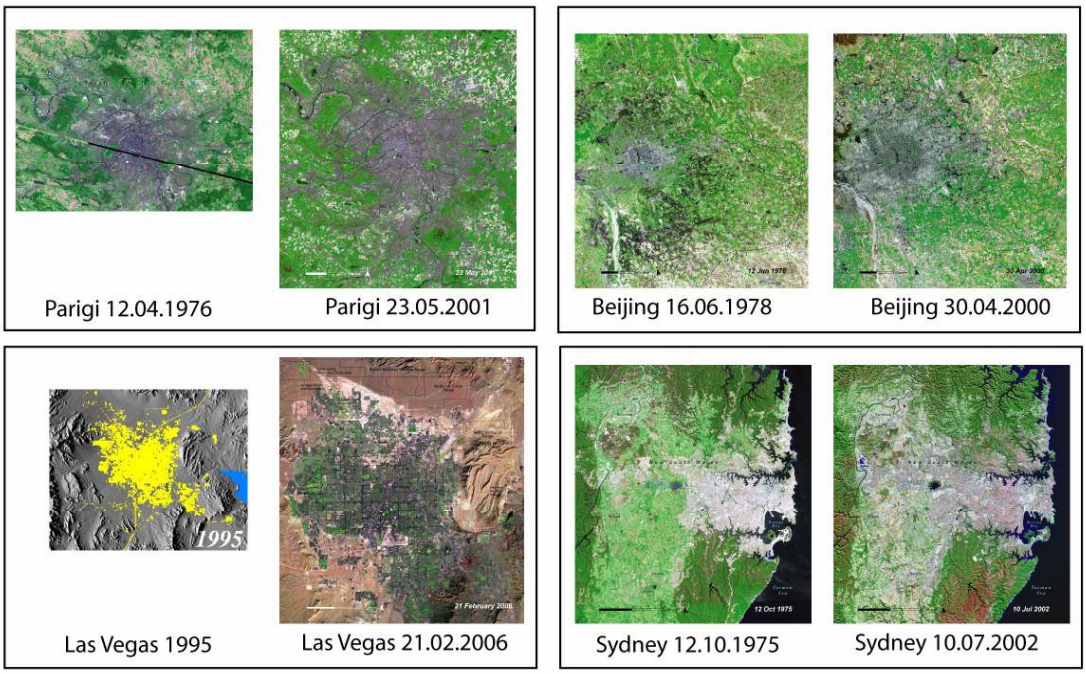


Figura 4 : Rapido sviluppo delle aree urbanizzate in alcune aree urbane del mondo, visto da satelellite. Il territorio urbanizzato appare in grigio.

2.2 LE AREE URBANE E I RISCHI NATURALI

L'area urbana moderna è definita come unità fisiografica a sé stante, tradizionalmente intesa come luogo di residenza di abitanti e sede dell'attività amministrative, produttive, economiche–commerciali e socio-politico-culturali. L'area urbana nell'accezione appena descritta, costituisce un sistema aperto, molto complesso dove il grande addensamento di popolazione, attività, di infrastrutture determina un grande valore esposto e quindi un elevato rischio potenziale. Le risorse naturali di cui può disporre un ambiente urbano sono quelle che poi ne costituiscono anche il valore: popolazione, risorse energetiche, minerarie, idriche, il territorio stesso con la sua morfologia e il suo sottosuolo. Il sistema naturale oltre che favorire potenzialmente un ambiente urbano presenta anche diverse pericolosità con cui la società si deve necessariamente confrontare: terremoti, attività vulcanica, rischi per la salute, alluvioni, fenomeni di subsidenza ne sono solo alcune.

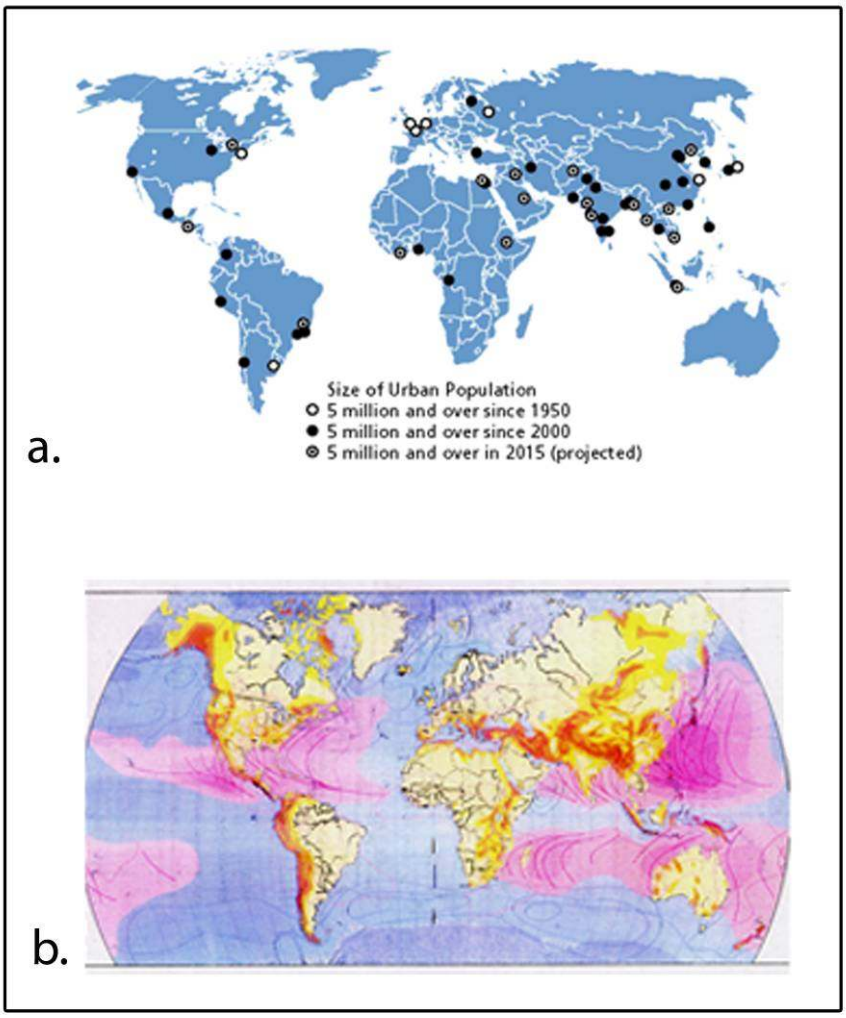


Figura 5:
a. Distribuzione mondiale delle *megacities,* aree urbane con almeno 5 milioni di persone negli anni 1950, 2000 e la proiezione per il 2015 (rapporto: State of world population 2007 United Nations population fund – UNPFA**);**
b. .Mappa della distribuzione mondiale dei rischi naturali.

Sostanzialmente le aree urbane occupano il 3 % della superficie terrestre ed in particolare il 75 % si sviluppa in aree costiere e con forte propensione ai rischi naturali (Fig. 5). Nel 1994 su un totale di 22 megacities, circa 13 si trovavano in aree di elevata pericolosità, per esempio suscettibili a eventi sismici, vulcanici, alluvioni e cicloni (Blaikie *et al.* 1995). Le dieci città più popolate oggi si trovano in Asia, in corrispondenza delle area con la maggior concentrazione di rischi naturali, come è evidente dal confronto tra le immagini 4b e 4c. Sempre più spesso eventi catastrofici naturali colpiscono aree ad elevata densità di popolazione, come l'uragano *Katrina* scatenatosi il 23 Agosto 2005 a New Orleans negli Stati Uniti, il terremoto del 15 Luglio 2008 in Grecia, lo tsunami del 26 Dicembre 2004 nel Sud Est asiatico per citarne alcuni dei più recenti e disastrosi.

I governi dei diversi Paesi nel mondo si trovano, perciò, ad affrontare le calamità naturali come eventi spesso ineluttabili e ad essere impegnati, con il supporto tecnico degli enti istituzionali ed universitari di ricerca nell'individuazione di strategie e piani per la previsione, prevenzione e gestione delle emergenze associata ai disastri naturali. Un approccio multidisciplinare ed integrato diventa condizione imprescindibile per la pianificazione urbana.

Ogni rischio naturale può essere definito come disastro potenziale con un bilancio in termini di perdita di vite umane e danni economici, che produce un elevatissimo costo sociale dell'ordine di decine di miliardi di euro. Dal momento che la sicurezza assoluta non è una condizione possibile, ciò che si cerca di ottenere è un rischio razionalmente accettabile, attraverso strategie mirate alla previsione, prevenzione e mitigazione degli eventi potenzialmente dannosi.

In Italia non vi sono *megacities*, ma sono molte le aree metropolitane dove la presenza dell'uomo è dominante. Come si evince dalla Tabella 2 il 40.98% dell'intera popolazione italiana vive nelle aree urbane e il 64.06% di questa vive nei centri principali. E' interessante notare come i centri urbani principali si estendano demograficamente oltre i propri limiti territoriali amministrativi, fondendosi con il tessuto urbano dei comuni limitrofi che ne costituiscono l'*hinterland*.

Le città si sono estese intorno ai nuclei abitativi originari, creando agglomerati urbani di decine di km di raggio che hanno modificato radicalmente le condizioni ambientali pre-insediamento. Nella maggior parte dei casi l'intervento dell'uomo è stato "a macchia d'olio": si è edificato per soddisfare le nuove esigenze urbanistiche, tenendo conto di criteri sociali e politico-economici, senza analizzare la propensione naturale del territorio e la sua conformazione geologica ed idrogeologica.

Area	No. of Municip.	Inhabitats × 1000 Chief town	Other mun.	Total	Km²	Inhab./Km²
Turin	315	962	1,268	2,230	6,830	327
Genoa	67	675	271	946	1,836	515
Milan	249	1,371	2,532	3,303	2,763	1,413
Venice	43	308	508	816	2,460	332
Padova	105	215	603	818	2,142	382
	148	523	1,111	1,634	4,602	355
Bologna	60	404	501	905	3,702	244
Modena	47	176	427	603	3,450	113
	107	580	928	1,508	7,152	211
Florence	51	402	778	1,180	3,880	304
Rome	119	2,693	969	3,662	5,352	684
Naples	92	1,054	1,942	2,996	1,171	2,559
Bari	48	341	1,160	1,501	5,138	292
Brindisi	20	92	314	406	1,839	221
Taranto	28	232	356	588	2,437	241
	96	665	1,820	2,495	9,414	265
Reggio Calabria	97	170	394	564	3,183	177
Messina	108	272	411	683	3,248	210
	205	442	805	1,247	6,431	194
Palermo	82	697	522	1,219	4,992	244
TOTAL	**1,531**	**10,064**	**12,956**	**23,120**	—	—
ITALY	**8,100**	**15,711**	**40,700**	**56,411**	**301,302**	**187**

Practically the 18,90% of Italian Municipalities participate of these metropolitan areas, the 64,06% of the population living in of the chief towns, the 31,83% in the other municipalities: then these areas involve the 40,98% of the whole Italian population. For comparison:

	Inhab. × 1000	Km²	Inhab./Km²
Stockholm (Län)	1,642	6,488	253
Madrid (Comunidad autónoma)	4,846	8,028	604
Barcelona (Provincia)	4,577	7,728	592

Tabella 2: Numero di abitanti delle aree metropolitane italiane riferiti a dicembre 1991.

I rischi naturali e nello specifico quelli geologici sono molteplici e la loro distribuzione ed intensità varia in modo non casuale, in funzione di fattori caratteristici e determinanti. Principalmente possiamo dividere e rischi in tre categorie:

1. rischi di origine endogena, cioè innescati da processi geodinamici;
2. rischi di origine esogena, cioè relativi a processi gravitativi e climatici;
3. rischi di origine antropica, cioè dovuti all'attività dell'uomo.

Pericolosità associate a terremoti e al vulcanismo appartengono alle prima categoria e hanno una distribuzione coincidente pressappoco con i margini di placca e testimoniano la vitalità del nostro pianeta. Numerosi sono gli studi in tutto il mondo che riguardano il rischio sismico e vulcanico, in particolare sono studi di previsione di scenari di massima intensità.

Per quando riguarda il rischio sismico gli studi sono molteplici (Cornell 1968, Gelfond *et alii* 1972, Hirosawa *et alii* 1992, Kappos *et alii* 1998) e coprono un campo che va dalla geofisica (modellizzazione delle sorgenti sismiche), alla geologia (studi strutturali sui campi di deformazione a scala crostale), all'ingegneria geotecnica (studi di amplificazione delle onde sismiche nei terreni). I terremoti inoltre possono costituire

l'innesco di ulteriori pericolosità quali la liquefazione, l'instabilità di pendii, la generazione di tsunami, spesso più dannosi del terremoto stesso.

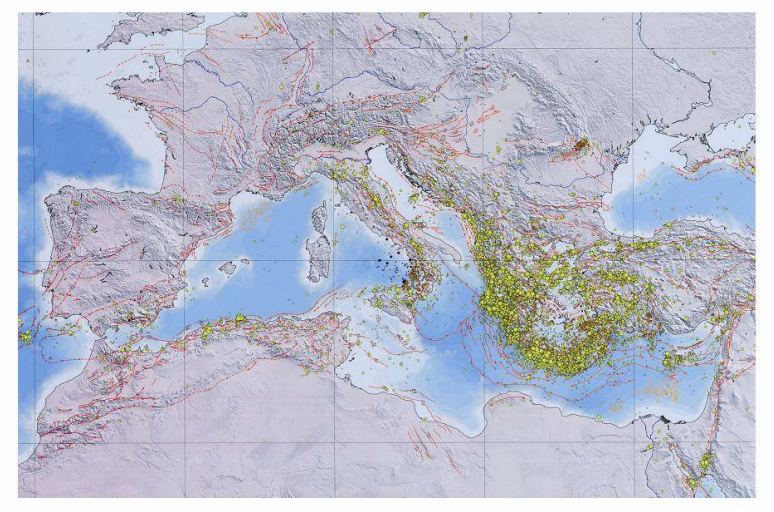


Figura 6: Carta geodinamica del Mediterraneo, con illustrati gli epicentri dei terremoti e i principali sistemi di faglie attive (Cadet & Funiciello 2004)

In Europa, in particolare lungo la fascia mediterranea, gli eventi simici sono frequenti e di elevata energia (Fig 6), legati alla tettonica post-collisionale alpina e appenninica, riconosciuta lungo tutti i segmenti orogenici della nostra penisola (Valensise & Pantosti 2001) ed alla subduzione attiva nel Mar Egeo. Uno dei terremoti più violenti manifestatosi in Europa fu il terremoto di Lisbona nel 1755. La distruzione di Lisbona in seguito al terremoto, agli incendi e agli tsunami che ne seguirono, impressionò molto il mondo occidentale, molto di più di qualunque calamità precedentemente avvenuta (Fig 7).

Figura 7: Vecchia incisione che rappresenta il terremoto di Lisbona del 1755: palazzi che crollano e le onde di tsunami che si abbattono sulla popolazione mentre la città brucia (Scribner, Walford and Co)

Terremoti catastrofici che segnarono profondamente il nostro Paese furono quello di Messina del 1908, di Avezzano 1915, del Friuli 1976, dell'Umbria-Marche 1997. In seguito a quest'ultimo l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ha avuto l'incarico di redigere la nuova classificazione sismica di tutto il territorio italiano (OPCM n 3274 del 20 Marzo 2003, aggiornata con il l'OPCM n 3519 del 2006).

Per quel che concerne il rischio vulcanico esso è determinato dalla presenza di vulcani attivi o quiescenti e al tipo di attività ad essi associata, funzione del contesto geodinamico in cui si inseriscono (Decker & Decker 1989, Tilling 1989). Gli studi in questo campo sono rivolti alla previsione delle eruzioni attraverso l'individuazione dei fenomeni precursori ed alla determinazione dei tempi di allertamento della popolazione (Saito *et alii* 2001). Il rischio vulcanico è spesso associato a fenomeni gravitativi tipo lahar ed al gas hazard ossia ad emissioni gassose di CO_2 ed altri gas vulcanici in concentrazioni nocive. Esempi in tal senso furono il caso del Nevado del Ruiz nel 1985 con l'incredibile *lahar* innescato dallo scioglimento dei nevai per l'aumento della temperatura connesso dell'attività vulcanica, e i casi dei laghi di Nyos e Monoum in Cameroun avvenuti nel 1986 e 1984 (Rice 2000). In questi laghi vulcanici in configurazione stabile, in seguito ad iniezione di fluidi endogeni, si sono generate onde di decine di metri che hanno innescato *lahars* al di fuori dell'orlo calderico e soprattutto vere e proprie colate di anidride carbonica assoluta dall'acqua fuoriuscita, mietendo vittime nei paesi lì intorno.
Esempi del potere distruttivo del vulcanismo esplosivo in alcune città del mondo sono mostrati nella Figura 8.

In Europa i vulcani attivi si trovano in Italia ed in Grecia.: il Methana presso Atene, Milos, Nisyros, l'isola di Santorini, le Isole Eolie con Vulcano, Stromboli e Panarea, l'Etna e i centri quiescenti del Somma-Vesuvio, Campi Flegrei e dei Colli Albani. In particolare per il Vesuvio, considerando la sua storia eruttiva (l'eruzione pliniana del 79 d.C. che seppellì Pompei ed Ercolano e quelle esplosive del 1631 e del 1944) e la sua attività esplosiva (Fig. 9), è atteso un evento parossistico per il quale da diversi anni la Protezione Civile sta preparando un piano di evacuazione, già in verifica di fattibilità con esercitazioni. L'area è oltretutto densamente abitata e gli sforzi che si stanno compiendo dal punto scientifico sono quelli di previsione anticipata dell'evento tale da consentire l'attuazione del piano.
Pericolosità connessa ad emissioni di CO_2 e gas di origine profonda è studiata nell'area dei Colli Albani (Carapezza *et alii* 2004, Barberi *et alii* 2007), dove si verificano periodicamente flussi anomali di tali gas endogeni. Recentemente sono stati avviati studi di pericolosità sul lago di Albano-Castel Gandolfo, per monitorare il profilo delle caratteristiche fisiche (pH, T, conducibilità) e delle concentrazioni dei gas disciolti nelle sue acque (Carapezza *et alii* 2005, Anzidei *et alii* 2008). Testimonianza fossile dei lahar generati dal lago di Albano durante l'Olocene sono riconosciuti nei depositi della formazione del Tavolato (Funiciello *et alii* 2003, De Benedetti *et alii* 2008), alle

propaggini nord occidentali dell'edificio vulcanico laziale e nella parte sud orientale della città di Roma.

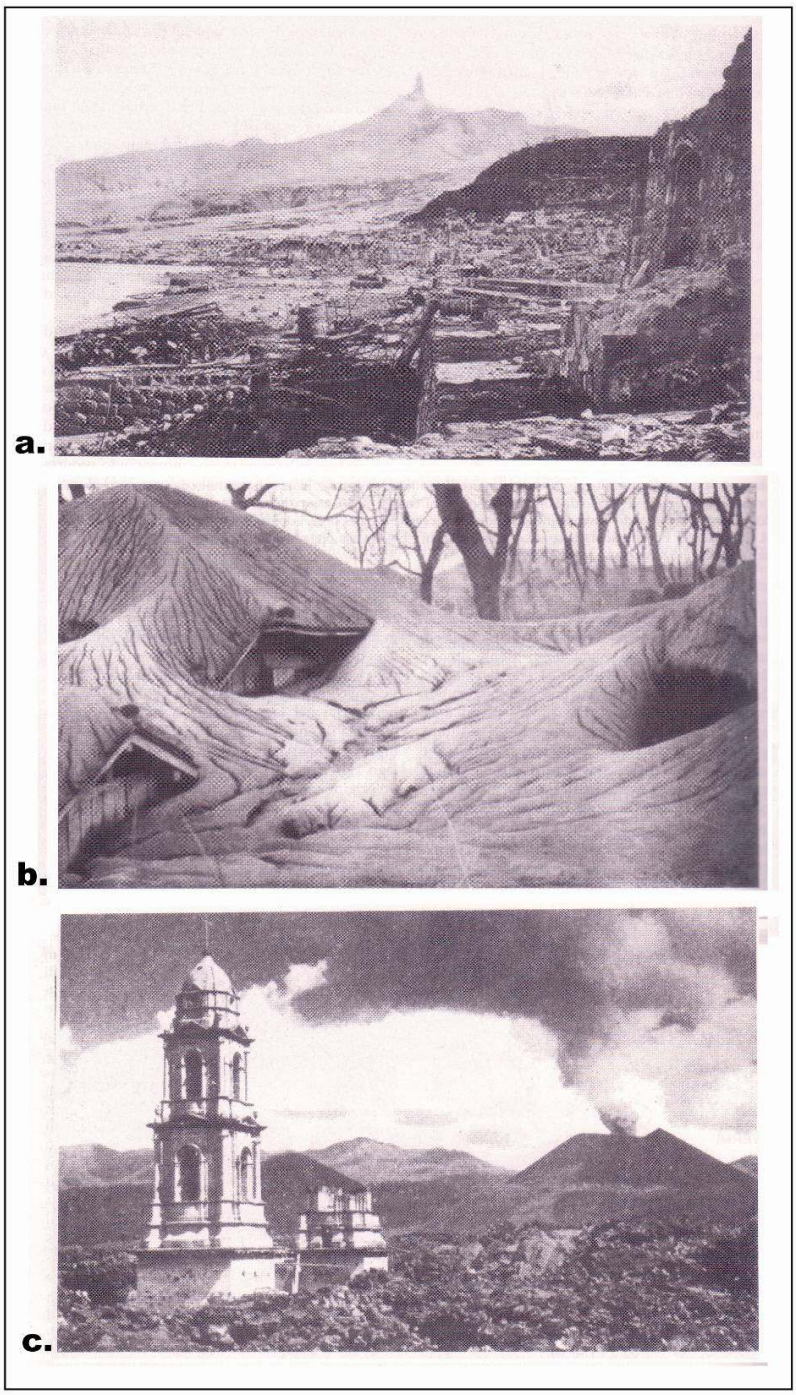


Figura 8: Scenari post eruzione vulcanica:**a)** Rovine di St. Pierre in Martinica dopo l'eruzione del Monte Pelee, quiescente da 50 anni; le prime fasi furono caratterizzate dall'emissione di gas e ceneri accompagnate dall'attività vulcanica; l'attività ricominciò in Febbraio, ad Aprile si intensificò e ad inizio Maggio si verificò lo straripamento di un lago posto alla sommità del vulcano e conseguente maar lungo i fianchi del Monte. L'8 Maggio si scatenò la nube ardente che rase al suolo la città (foto A. Lacroix). **b)** Scuola di campagna sepolta da ceneri vulcaniche eruttate dal vulcano Sakurajima, Giappone, nel 1914. Il problema delle ceneri da ricaduta è spesso sentito a Catania il cui aeroporto è rimasto diverse volte chiuso per l'accumulo di ceneri dell'Etna sulle piste e la scarsa visibilità (foto F. Perret). c) Colata di lava fuoriuscita dal vulcano Paracutin che sommerse San Juan Parangaricutiro nel Giugno del 1944 (foto Tad Nichols). Destino che sarebbe toccato a Zafferana Etnea, alle pendici dell'Etna se nel 1983, la colata non fosse stata deviata grazie all'intervento della Protezione Civile italiana.

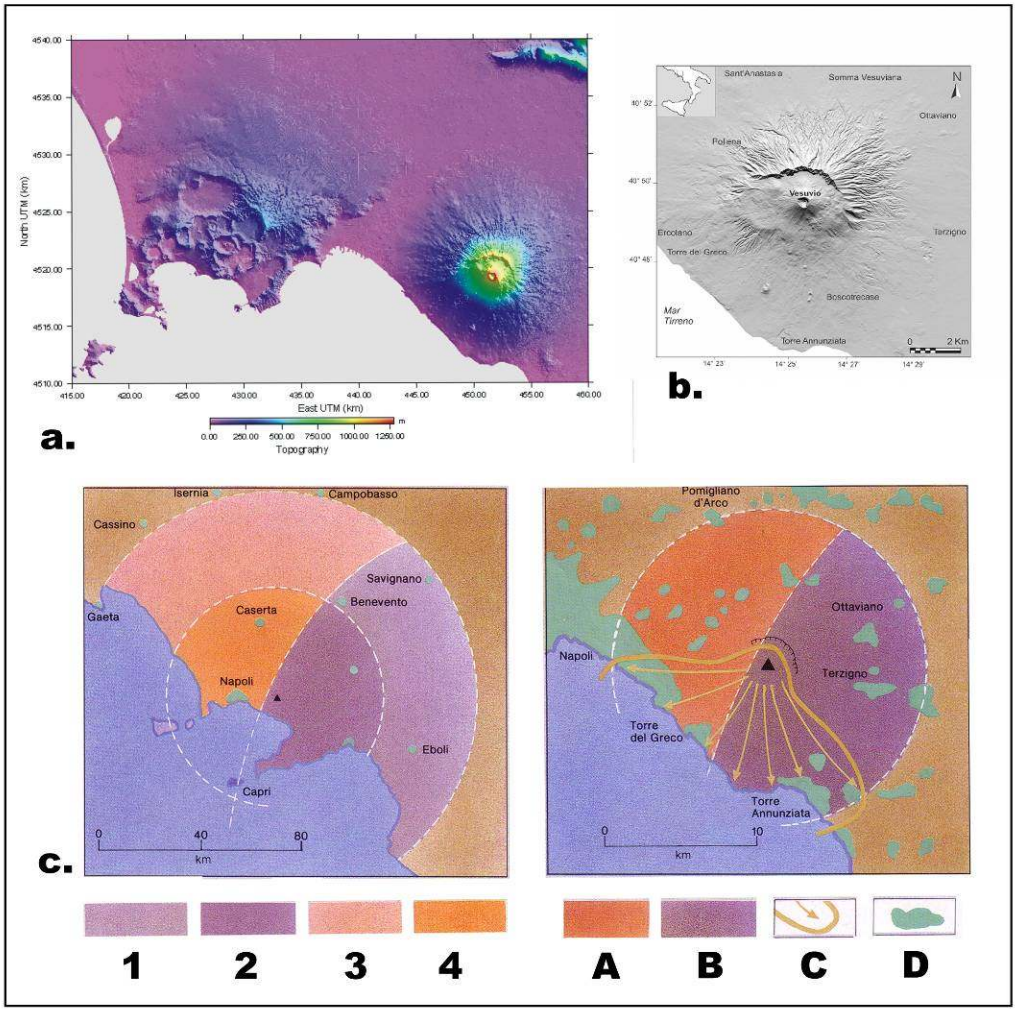


Figura 9: **a.** Modello digitale del terreno a 20m dell'area compresa tra i Campi Flegrei (ad Ovest) ed il Somma-Vesuvio (a Sud Est); **b.** DEM del vulcano vesuviano e ubicazione delle aree urbane nel suo intorno, aree ad alto rischio qualora ci fosse una eruzione parossistica. L'ultima attività del vulcano risale al 1944. Da allora è quiescente sebbene sia sempre presente l'attività di degassamento e tremori sismici. **c.** Nelle due carte sono illustrate le aree che possono essere interessate da caduta di materiali piroclastici durante eventuali eruzioni pliniane del Vesuvio. Nella carta a destra si individuano 4 aree: 1 accumuli di lapilli e cenere per spessori di almeno 25 cm; 2 come 1 ma con spessori di più di 100 cm; 3-4 analoghe alle aree pecedenti ma con minore probabilità di venire ricoperte a causa della direzione predominante dei venti stratosferici. La carta a sinistra, con un dettaglio crescente, mostra le aree che potrebbero venire ricoperte da spessori di materiale piroclastico ancora maggiori in dimensioni, con una minore probabilità nel settore A. Nel settore B gli spessori potrebbero raggiungere i 400 cm con bombe ed eietti balistici di dimensioni anche notevoli. Con C sono indicate le aree che potrebbero essere interessate da base *surge*, flussi piroclastici e *lahar*. Con D sono indicate le aree abitate. (da Scandone & Cortini, 1982).

Le pericolosità connesse all'evoluzione geomorfologia del territorio e ad eventi meteorologici, quali uragani, trombe d'aria, dissesti idrogeologici, sprofondamenti naturali (*sinkholes*), alluvioni, valanghe, hanno una distribuzione relativa alle fasce climatiche ed alle caratteristiche topografiche e geologiche. Gli uragani, trombe d'aria, cicloni e altri fenomeni simili sono tipici delle basse latitudini, connesse a depressioni bariche molto

pronunciate e all'incontro di masse d'aria calda con masse d'aria fredda (forti gradienti di temperatura. I dissesti idrogeologici sono invece ampiamente diffusi e si originano in funzione delle caratteristiche geologiche, dei dislivelli altimetrici e delle pendenze, ma soprattutto sono innescati frequentemente da eventi piovosi eccezionali. Nel dissesto idrogeologico ha infatti un ruolo determinante l'elemento acqua, in grado di produrre variazioni nelle tensioni totali del terreno o produrre eventi di piena dei corsi d'acqua. Piogge non intense ma prolungate nel tempo possono imbibire facilmente depositi limo-sabbiosi e produrre colamenti e frane con cinematica più o meno complessa. I processi gravitativi possono essere innescati anche da eventi sismici (Fig. 10) e in ambiente urbano ci possono essere diversi fattori che attivano o influenzano in modo determinante il movimento franoso (vedi perdite dalle fogne, dal sistema idrico, estrema impermeabilizzazione del suolo, modellamento con cambi drastici nella pendenza di versanti, sovraccarico, denudamento del versante, degrado ambientale in genere).

Recentemente sono stati avviati studi sui dissesti provocati dall'apertura di voragini di origine naturale definite *sinkhole*. Tali collassi naturali repentini e di estensione anche considerevole sono connessi di solito a fenomeni di dissoluzione, spesso in ambienti carsici o in depositi gessosi – salini (Fig 11). Nel 2004, l'Agenzia governativa italiana per il territorio, l'attuale INSPRA, ha promosso un convegno sullo stato dell'arte dello studio relativo ai *sinkholes*, sia di origine naturale sia di origine antropica, ed è disponibile online il censimento effettuato su tutta Italia.

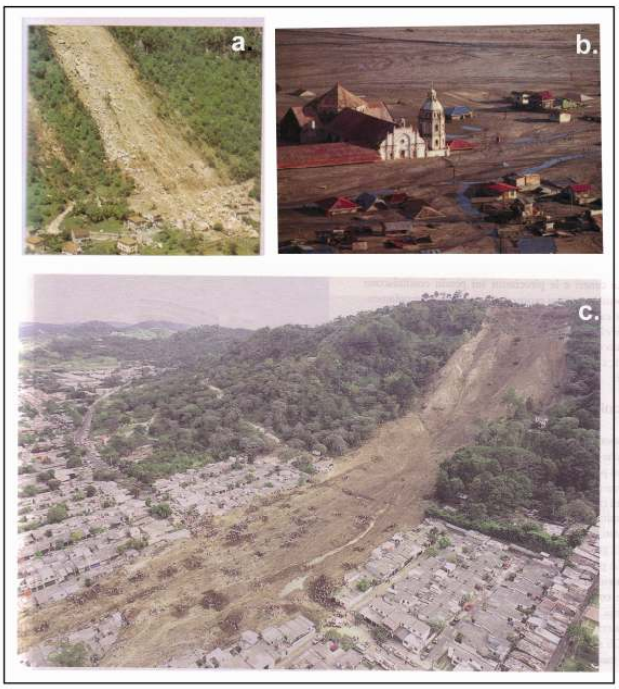


Figura 10: Esempi di dissesto idrogeologico:
a. frana di crollo presso l'abitato di Braulins (Udine), che ha causato l'interruzione della strada e danni ad edifici (Pubbli/Aer/Foto, Milano);
b. disastroso lahar di Bacolor nelle Filippine;
c. frana causata dal terremoto di El Salvador del 13 Gennaio 2001, in un pendio sovrastante la Colonia Las Colinas, nel comune di Santa Tecla, Nuovo San Salvador (Agenzia EFE).
Le accelerazioni sismiche applicate alle ceneri vulcaniche (limo sabbioso e lapilli) costituenti il pendio provocarono un colamento molto rapido di circa 90,000 m^3 (dal volume Geoingegneria, a cura di L. I. Gonzàlez de Vallejo, 2005)

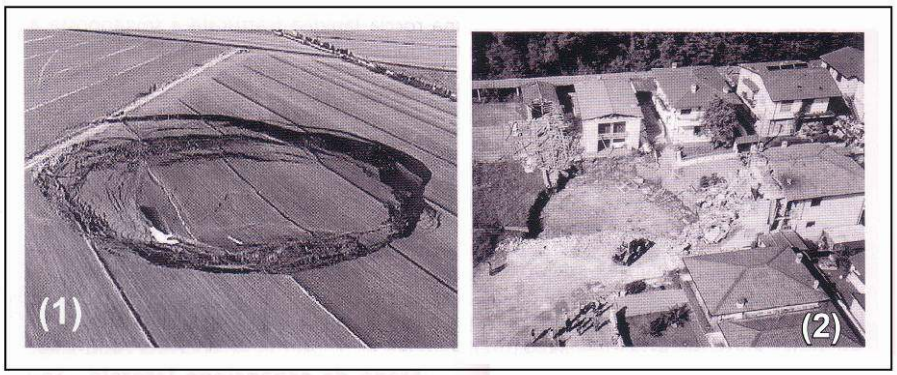


Figura 11: Sprofondamenti **(1)** a Marcellina nel Lazio (2002, dal sito della protezione civile), e **(2)** a Camaiore, Toscana (1995, Foto Barzotti), provocati dal crollo di cavità carsiche.

In Italia la pericolosità idrogeologica è una delle componenti principali che connotano la fragilità del nostro Paese. Insieme agli eventi sismici, le esondazioni e le frane costituiscono i disastri con maggiore numero di vittime e danni che si siano verificati nella nostra penisola. Citandone solo alcune si ricordano il disastro del Vajont del 1963 in Friuli, l'alluvione dell'Arno a Firenze nel Novembre 1966, la frana di Ancona nelle Marche del Dicembre 1982, alluvione della Valtellina nel1987 (alta valle del Tanaro) e quella del Po in Piemonte nel 1994, la frana di Sarno del Maggio 1998 in Campania, lo straripamento del torrente Beltrame a Soverato nel 2000 in Calabria. In Figura 12 sono illustrate alcuni di questi eventi catastrofici.

La pericolosità idrogeologica, intendendo principalmente le frane, viene affrontata attraverso diverse metodologie, dal telerilevamento, all'interpretazione di foto aeree, ai GIS, al rilevamento geomorfologico e sono molti gli sforzi nel senso del censimento e caratterizzazione quantitativa dei fenomeni che la identificano. In tale senso in Italia si è stato avviato il progetto IFFI, per l'inventario dei fenomeni franosi italiani, promosso dall'APAT, odierno INSPRA. Il Progetto IFFI ha lo scopo di fornire un quadro della distribuzione dei fenomeni franosi sull'intero territorio nazionale e fornire uno strumento conoscitivo di base per la valutazione della pericolosità da frana e per la programmazione degli interventi di difesa del suolo e per la pianificazione territoriale. E' stata proposta dunque una scheda frane IFFI, sulla base degli standard internazionali di classificazione e di nomenclatura. Attualmente sono stati censiti 470,000 fenomeni franosi che interessano un'area di 20,000 km^2, pari al 6.6 % del territorio nazionale (dati Convegno Progetto IFFI, 13.05.2008). Ben il 69 % del totale dei comuni italiani risulta interessato dai fenomeni franosi, considerando quelli attivi, quiescenti e fossili, e si trova quindi in aree esposte ad un potenziale rischio idrogeologico. Nel nostro Paese per il rischio idrogeologico sono competenti le Autorità di Bacino dei principali fiumi italiani. Istituite dopo il recepimento della normativa nazionale relativa all'articolo 12 della Legge n. 183 del 18 Maggio 1989,

tali autorità si occupano di elaborare il Piano di Bacino che ha valore di piano territoriale di settore ed è lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico-operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni e le norme d'uso finalizzate alla conservazione, difesa e valorizzazione del suolo ed alla corretta utilizzazione delle acque sulla base della corrette caratteristiche fisiche ed ambientali del territorio del bacino.

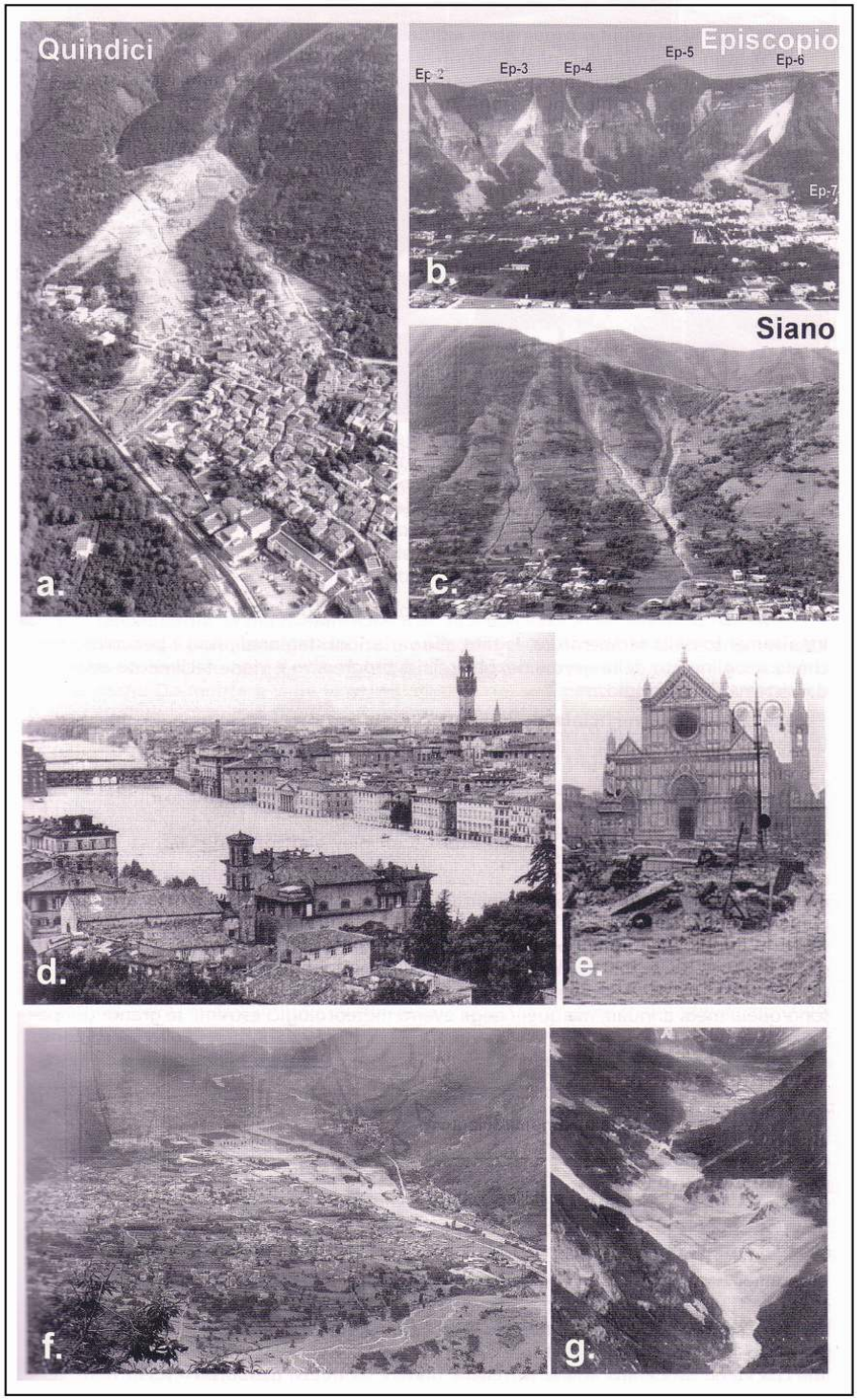


Figura 12: Esempi di dissesto idrogeologico in Italia: Le colate rapide di Sarno del 5 Maggio 1998 innescatesi dopo 9 giorni di pioggia continua: **(a) (c)** i Paesi investiti (Sarno, Quindici e, in misura minore, Bracigliano, Siano e S. Felice a Cancello) furono quelli ai piedi dei rilievi appenninici ad Est del Vesuvio; **(b)** Visione d'insieme dei bacini dissestati, aree sorgenti e di espansione delle colate di fango. E' da ricordare che fenomeni dello stesso tipo con un maggiore numero di vittime si erano verificati già innumerevoli volte in passato, per citarne una, Salerno e penisola amalfitana, 25-26 Ottobre 1954 con un bilancio di 313 vittime e 11,000 senzatetto (dal sito del Commissariato di Governo per l'emergenza idrogeologica in Campania; Alluvione di Firenze del 4 Novembre 1966: **(d)** l'Arno nel centro cittadino (Italfoto Gieffe, dal Piano di Bacino del fiume Arno, 1996), **(e)** la piazza di Santa Croce inondata (dal sito Mega); Alluvione della Valtellina del Luglio 1987 in seguito allo sbarramento del fiume Adda per frana: **(f)** inondazione dell'area di Morbegno e **(g)** lo sbarramento artificiale creato dalla frana staccatasi dal Monte Zandila in Val di Pola, sulla destra orografica dell'Adda, che rase al suolo Morignone e S. Antonio Morignone. Sullo sfondo, oltre l'invaso artificiale, si intravede la periferia di Bormio (Foto dal sito Logifranchi)

Esistono infine delle pericolosità non direttamente connesse alla popolazione, ma che ne danneggiano le attività ed in particolare le telecomunicazioni. E' il caso delle tempeste geomagnetiche di cui si occupa l'USGS, l'ente di ricerca americano, oltre allo studio delle pericolosità descritte precedentemente.

Le pericolosità finora illustrate sono connesse ad una fenomenologia di eventi in cui l'uomo non è parte attiva ma passiva. L'uomo ha spesso la responsabilità di non tener conto adeguatamente dell'evolversi naturale degli eventi e della loro precisa distribuzione geografica, occupando aree di evidente pericolosità. Nell'affrontare questi eventi per lo più disastrosi le istituzioni locali possono principalmente tentare di prevedere dove, quando e con che modalità ed intensità si verificherà l'evento calamitoso per provvedere ad allertare la popolazione e gestire al meglio le operazioni di evacuazione e sistemazione alternativa. La mitigazione del rischio avviene perciò controllando i fattori di vulnerabilità ed esposizione della comunità.

La terza categoria, invece è propria degli ambienti urbanizzati, dove l'uomo interviene sul territorio come un vero e proprio agente morfogenetico. Laddove la componente antropica è dominante, essa diventa un vero e proprio fattore predisponente al rischio. Lo sviluppo edilizio, l'ubicazione delle infrastrutture, l'intensità, frequenza e tipologia del traffico, le perdite delle condotte idriche e fognarie, il seppellimento di fossi e l'escavazione di alti morfologici, sono solo alcune delle cause dell'evoluzione spesso imprevedibile e con *feedback* negativo di diversi pericoli geologici presenti sui territori urbanizzati. Tale intervento antropico ha determinato l'insorgere quindi di una serie di pericolosità che si affiancano a quelle di tipo schiettamente naturale prima illustrate. Tra le pericolosità connesse con l'ambiente urbano si possono distinguere due tipologie: una dove l'uomo è

causa diretta e scatenante e l'altra dove l'uomo accelera i processi naturali. Le pericolosità determinate dall'uomo sono quelle connesse alla presenza di cavità antropiche, al dissesto legato ai terreni di riporto e alle perdite del sistema idrico-fognario, alla subsidenza relativa a miniere o ad estrazione di fluidi dal sottosuolo, ai ed all' inquinamento chimico dei fiumi e delle acque di falda, nonché dei suoli e dell'aria (Fig 13). Esistono poi fenomeni legati alle proprietà geotecniche dei terreni, come i cedimenti differenziali per consolidamento di terreni argillosi e l'amplificazione sismica in depositi alluvionali sciolti con forti contrasti di impedenza, in cui l'uomo si trova coinvolto a causa di una scarsa conoscenza o considerazione dei caratteri stratigrafici e geotecnici del proprio territorio.

Relativamente alla subsidenza geotecnica si può affermare che tale dissesto è silenzioso: produce notevoli danni agli edifici, ma non è eclatante in termini di perdite umane, in quanto si riesce ad intervenire prima del crollo. Per questo probabilmente viene poco considerato come geohazard, sebbene in molti Paesi il costo dei danni causati dalla subsidenza geotecnica sono uguali o superiori a quelli dovuti a terremoti e fenomeni franosi (Waltham 2002). Ne sono alcuni esempi i casi di Santa Clara in California, Los Angeles, New Orleans negli Stati Uniti, Shanghai, Bangkok in Asia e Londra, Venezia, Pisa in Italia.

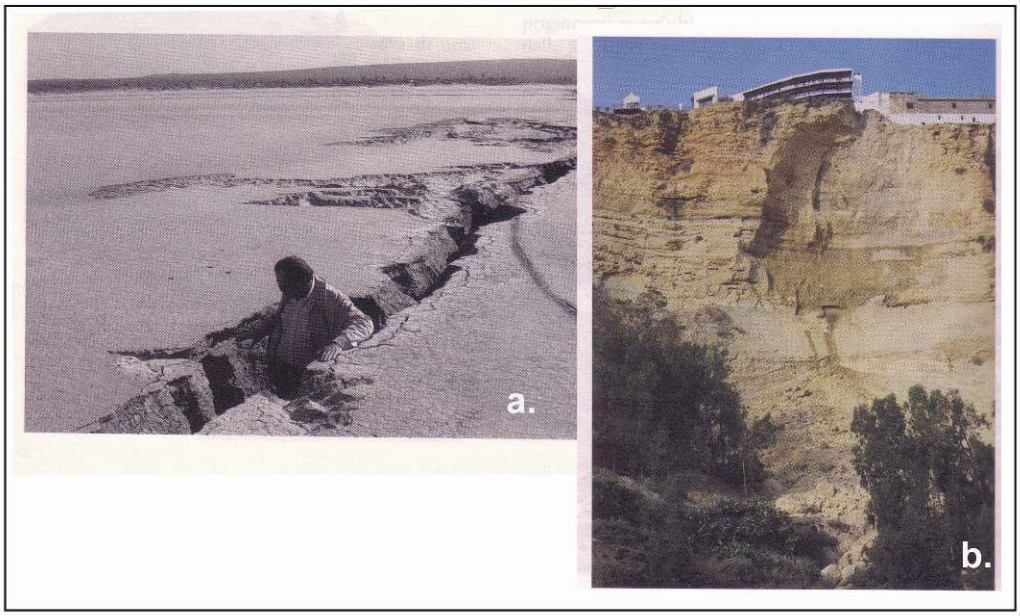


Figura 13: Dissesti di origine antropica legato allo sfruttamento eccessivo di risorse del sottosuolo o a degrado delle reti idriche: **(a)** fessure e depressioni sul Roger Lakebed, presso la Edwards Air Force Base, il sito di atterraggio delle navette spaziali (Antilope Valley, California), provocate dall'eccessivo emungimento delle acque sotterranee. La fessura in cui è calato il ricercatore, apertasi nel Gennaio 1991, è lunga 625 m (Foto Edwards Air Force Base); **(b)** crollo di un grande blocco in una scarpata calcarenitica dovuto a perdite nella rete idrica del paese, Arcos de la Frontiera, Càdiz (Foto M. Ferrer).

Occorre precisare che la pericolosità è uno dei fattori che determinano il rischio, secondo la formula **PxVxE=R** (dove **P** è la pericolosità relativa al rischio indagato, **V** è la vulnerabilità delle strutture esposte all'evento, **E** è il valore esposto in termini economici e di vite umane e **R** è il rischio) ed è definita come la probabilità che un evento di intensità nota si verifichi in un determinato intervallo di tempo (Varnes 1984). In ambito urbano, alcune pericolosità specifiche sono difficilmente identificabili con una periodicità o caratterizzate da un evento massimo atteso. In questa tesi si preferisce quindi parlare più genericamente di pericolo, evitando di introdurre la variabile tempo nella valutazione della pericolosità: pericolo di crollo cavità, pericolo relativo ad instabilità di depositi antropici, pericolo di cedimento in terreni compressibili, ecc.

In Figura 14 sono presentati l'incidenza delle problematiche ambientali urbane relative alla pericolosità naturali nell'Europa occidentale, dove la maggiore, con oltre il 90 % delle città campioni coinvolte, è relativa all'inquinamento e contaminazione delle acque di falda, risorsa preziosa e precipua per l'equilibrio delle aree urbane e di tutto l'ecosistema vegetale ed animale.

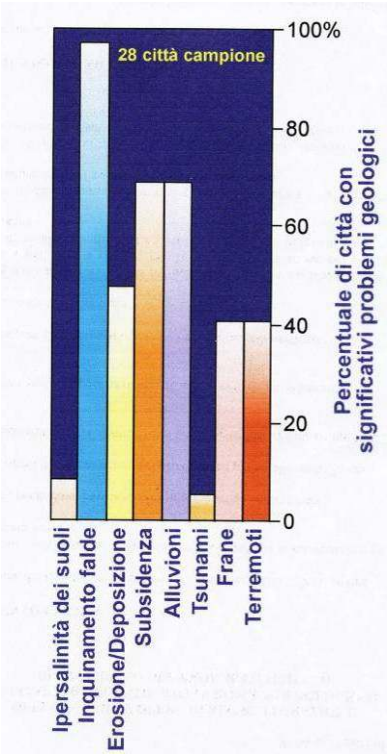


Figura 14: Grafico dell'incidenza di alcune pericolosità geologiche su 28 città campione dell'Europa occidentale, l continente più urbanizzato; esso rappresenta la percentuale di città che hanno significativi problemi connessi a specifici rischi ambientali e naturali, tipici degli ambienti urbani.

Il fattore antropico presenta una notevole difficoltà nell'essere modellizzato in quanto i fenomeni legati all'attività umana prima elencati, avvengono il più delle volte in modo casuale, intermittente e si tende a sottodimensionarne gli effetti sull'ambiente.

Inoltre l'acquisizione di dati relativi a tali situazioni avviene spesso con il monitoraggio post incidente e raramente preventivo, come mostrano i casi di Roma di via Giustiniano Imperatore (Campolunghi *et alii* 2007) o di Monteverde (Amanti *et alii* 1995).

L'ampliamento smisurato delle strutture urbane se realizzato senza adeguati piani di sviluppo può stravolgere drasticamente lo schema naturale del territorio. In particolare la crescita spaziale dei terreni di riporto necessari all'urbanizzazione e l'obliterazione del reticolo idrografico naturale e di siti ad elevata pericolosità per crollo catastrofico del suolo, possono influenzare negativamente i fattori di pericolosità a cui sono sottoposte le strutture urbane di superficie e in sotterraneo.

Le città storiche europee ed in particolare Roma sperimentano quotidianamente i dissesti indotti dall'attività umana, territori in cui l'evoluzione dinamica dei fenomeni naturali interagisce con le strutture antropiche e con le attività ed esigenze urbane da diversi millenni.

Dalla sintesi del quadro illustrato finora, si deduce che le città più sicure dal punto di vista geologico sono quelle costruite su rocce con pendenze dolci e basso livello di radioattività, quelle che si trovano ad una quota media sul livello del mare al di sopra dei 20 m, in aree a basso rischio sismico e vulcanico, non interessate nel passato da attività estrattiva mineraria o di fluidi.

E' necessario migliorare le metodologie di previsione, di prevenzione tenendo presente che le grandi aree urbane producono e sono allo stesso tempo vittime dei disastri naturali e che nel periodo 1994-2003 il costo relativo ad eventi catastrofici è stato pari a 672 miliardi di dollari americani.

Oltre ad un corretto approccio per trovate delle soluzioni geologiche all'aumento della pericolosità, il progresso tecnologico può essere di grande aiuto alla gestione di queste problematiche sia nella fase di analisi ed elaborazione di carte di pericolosità e di rischio, sia nel trovare tecniche di intervento meno invasivo sul territorio.

Sebbene sia prevista una crescita della popolazione fino almeno al 2050, ci si chiede fino a quando crescerà l'urbanizzazione. Il modello di città del futuro è quello di una città che si estende in verticale: verso l'alto costruendo grattacieli e sopraelevate, ma soprattutto verso il basso, utilizzando il sottosuolo come una quarta dimensione, dove far passare le infrastrutture della viabilità, le reti dell'energia, dell'acqua e dove fare lo stoccaggio dei propri rifiuti. Nello sviluppo urbano futuro la società per migliorare la qualità della vita non potrà più sottovalutare, trascurare od ignorare la protezione ambientale. La normativa ambientale dei Paesi occidentali sta ponendo le basi dell'ufficializzazione della

preservazione e tutela della risorsa ambientale del territorio. Infine, verosimilmente, ad essa si affiancherà un ulteriore progresso tecnologico e la ricerca nelle geoscienze contribuirà a stabilire regole e limiti dell'utilizzazione del sottosuolo.

2.3 LE PERICOLOSITÀ GEOLOGICHE NELLA CITTÀ DI ROMA

In Italia sono molte le aree metropolitane esposte alle pericolosità geologiche tipicamente urbane. Roma è la città più popolosa d'Italia con circa 2,7 milioni di residenti e un flusso di persone con picchi di 4 milioni (ISTAT 2008). Ha una superficie di circa 1,285 km^2, costituita nella parte centrale dalla piana alluvionale del Tevere, ad Est dai depositi del vulcano dei Colli Albani e a Nord Ovest è dominata dall'alto strutturale di Monte Mario. Roma con i suoi 3000 anni di storia documentata da una prospera produzione iconografica prima e cartografica poi, offre la straordinaria possibilità di seguire praticamente passo dopo passo la sua evoluzione urbanistica e ricostruire le modificazioni del territorio.

2.3.1. Urbanizzazione e condizioni geologiche

Il primo nucleo abitato dell'area romana risale al Neolitico-Eneolitico e non occupava l'area dei sette colli, probabilmente per condizioni climatiche sfavorevoli, ma si trovava più verso l'interno della campagna romana. Fin dal terzo millennio però, gli uomini si insediarono sulla riva sinistra del fiume Tevere, sfruttando il favorevole assetto geologico e geomorfologico, con i villaggi di *Crustumerium, Fidenae, Antemnae*, ecc. (Fig. 15). Essi occupavano una posizione strategica: erano prossimi al fiume, essenziale per l'agricoltura e per il commercio, in quanto via di trasporto, dominavano dalle colline tufacee la piana alluvionale, disponevano di acque sorgive e di materiali da costruzione solidi e di facile lavorazione. Tra questi villaggi emerse Roma che approfittò della sua posizione naturale privilegiata ed estese ben presto il suo potere sull'intera regione Lazio e da qui all'Italia, all'Europa ed al Mediterraneo.

Lo sviluppo della civiltà romana e della sua area urbana è strettamente connesso alle condizioni geologiche che ha fornito Roma di risorse preziose (idrica e di materiali da costruzione) ed un microclima favorevole. Gli antichi romani seppero sfruttare con ingegno le risorse che il territorio offriva e la loro espansione territoriale ne fu profondamente dipendente. Il connubio tra la l'evoluzione dell'area urbana di Roma e le sue risorse del territorio risulta evidente analizzando dal punto di vista storico il processo di espansione romano e l'andamento demografico della popolazione, dalle origini fino all'età pre-contemporanea, mettendolo in relazione con lo sviluppo ed il funzionamento degli acquedotti (Fig 16). Gli acquedotti, opera ingegneristica notevole, portavano a Roma

le acque delle sorgenti appenniniche ed ogni cittadino romano aveva a disposizione una quantità d'acqua paragonabile a quella nell'epoca moderna. Furono costruiti scegliendo il tracciato che si mantenesse su basse pendenze e quindi, pur con un percorso più lungo, esso passò sul plateau vulcanico per poi girare verso Nord Ovest in direzione dell'Appennino.

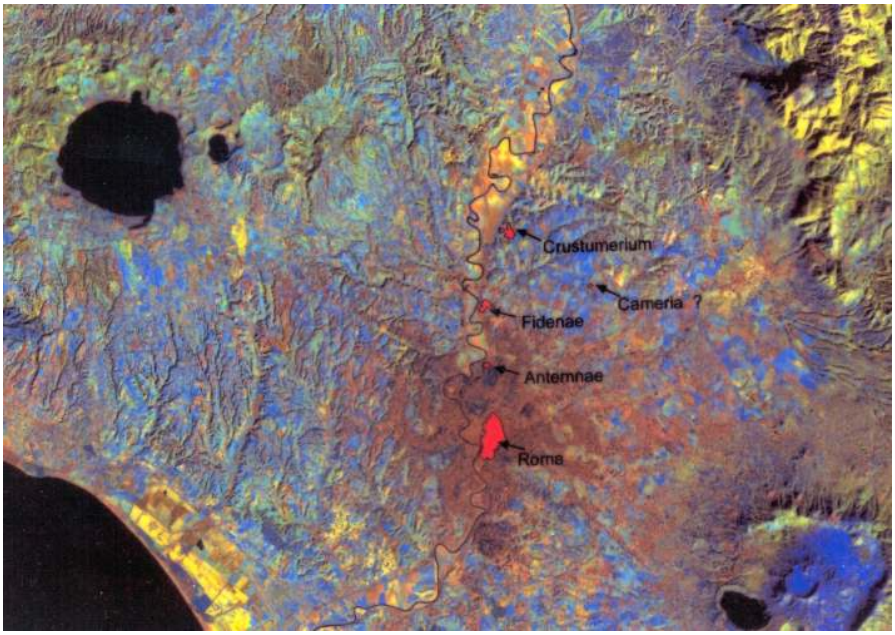


Figura 15: Ubicazione dei villaggi arcaici lungo il fiume Tevere durante il terzo millennio a.C., prima di arrivare all'insediamento su cui si svilupperà la futura città metropolitana di Roma.

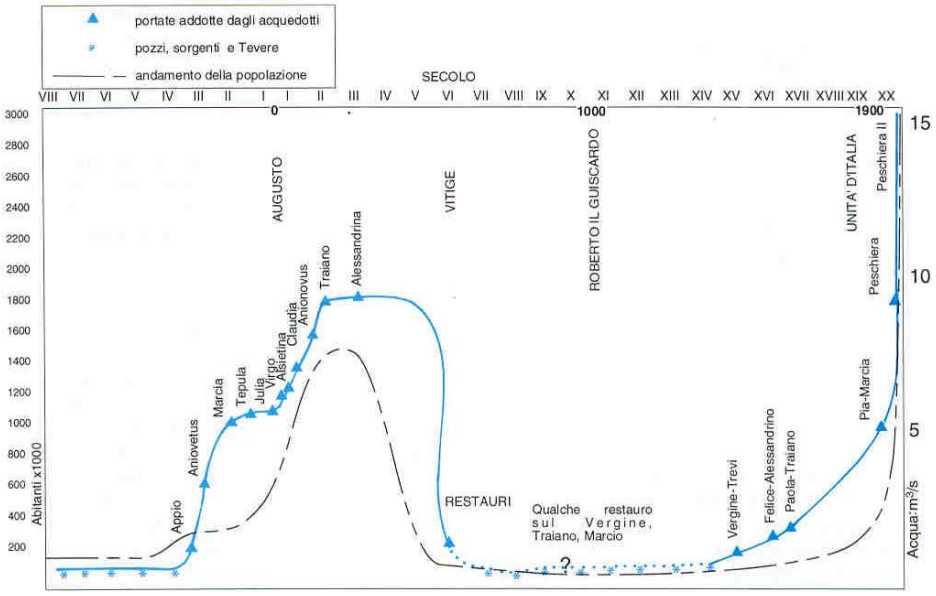


Figura 16: Grafico dell'andamento della popolazione che ha risieduto nella città di Roma a partire dalla sua fondazione. L'andamento di tale curva è confrontabile con l'andamento della curva in azzurro che rappresenta la portata d'acqua potabile disponibile per la popolazione romana nella sua storia. Risulta evidente lo stretto legame tra la crescita demografica e le disponibilità idriche, nonché il ruolo strategico degli acquedotti, che dalle fonti dell'Appennino portavano acqua alla città.

Dopo la caduta dell'Impero, Roma subì un rapido declino demografico e perse la capacità tecnica di gestire gli acquedotti, i quali vennero restaurati solo mille anni più tardi. Questo è un tratto peculiare del processo di urbanizzazione della città di Roma. Essa conobbe il suo massimo splendore durante l'Impero romano e poi un lungo periodo di stasi. Nel 1880 la città era praticamente quella dovuta all'espansione romana e si trovava ancora racchiusa all'interno delle Mura Aureliane (Fig. 17).

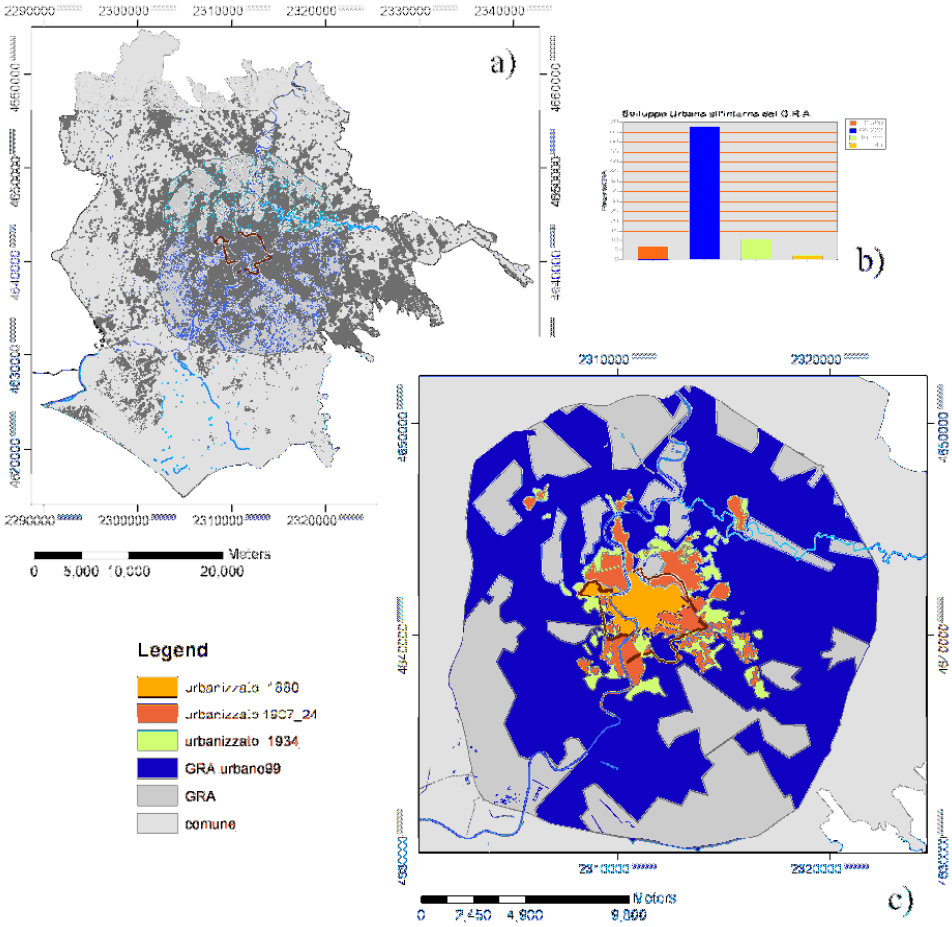


Figura 17: **a)** Area del Comune di Roma , in grigio più scuro l'area compresa all'interno del Grande Raccordo Anulare (GRA),; sono evidenziati in grigio molto scuro gli edifici, in marrone scuro il percorso delle Mura Aureliane, in blu e celeste il sistema idrografico del Fiume Tevere; **b)** Grafico delle percentuali di area urbanizzata rispetto all'area compresa dal GRA in diverse epoche: 1880, 1907-24, 1934, 1999; i colori corrispondono alla legenda in c); **c)** Rappresentazione delle aree urbanizzate ottenute a partire dalla cartografia storica relativamente alle epoche illustrate dal grafico in b).

Solo dopo l'Unità d'Italia prima ed il secondo dopoguerra poi, Roma conobbe una forte espansione edilizia, in parte legata alla pianificazione dei nuovi piani regolatori, in parte all'abusivismo dilagante. Tale evoluzione urbanistica fa sì che nell'area comunale vi siano delle forti differenze tra le aree di recente urbanizzazione e quelle di urbanizzazione storica in termini di tecniche costruttive, caratteristiche del sottosuolo e dei terreni di riporto, cosa

che si ripercuote sulle problematiche relative a fenomeni di pericolosità specifici. In Tabella 3 si sintetizza l'andamento dello sviluppo urbanistico analizzato con l'ausilio del GIS, georeferenziando la cartografia storica a disposizione, e quello della popolazione.

	1880	1907/24	1934	1999	1999 GRA
% rispetto al territorio comunale	0.6	1.9	2.8	43	18.5
% rispetto al territorio all'interno del GRA	2.1	6.9	10.4	--	68.2
Popolazione	212,000	422,000	931,000	2,700,000	--

Tabella 3: Percentuali delle aree urbanizzate relative a diversi periodi storici (ottenute dall'analisi della corrispondente cartografia), calcolate rispetto all'area del comune di Roma e rispetto all'area compresa all'interno del GRA. Per ogni epoca si è poi indicato il numero di residenti (dati Treccani, Dizionario Enciclopedico ed ISTAT per il Comune di Roma).

I primi studi scientifici sulla conformazione fisica del territorio dell'Urbe risalgono al periodo illuminista e rispondono all'esigenza di poter stimare i valutare il patrimonio edilizio della città. Nel 1748 Giovan Battista Nolli pubblica la prima pianta topografica di Roma riprodotta con metodi e strumenti moderni: rilevò su base trigonometrica e tavoletta pretoriana. Fu dedicata particolare cura nella riproduzione del tessuto urbano cittadino entro le Mura Aureliane. Tale base topografica verrà usata da Giovan Battista Brocchi nella realizzazione della carta geologica di Roma. Nella sua carta del 1820 (Fig. 18) Brocchi rappresenta la superficie originaria di Roma, cioè quella della sua fondazione. Egli applica per la prima volta una metodologia inedita per studiare il sottosuolo di aree intensamente antropizzate. Facendo uso di una "robusta trivella", il Brocchi riusciva a passare lo spessore dei riporti e campionare il depositi originari in posto. Nella "Carta fisica del suolo di Roma" viene ricostruita la morfologia di Roma pre-urbanizzazione a partire dalle quote certe della base topografica fornita da Nolli. In essa sono riportati i limiti dei rilievi tufacei in riva sinistra del Tevere (i sette colli), l'articolata struttura della dorsale Gianicolo-Monte Mario, la morfologia esatta della piana alluvionale tiberina, i suoi rilievi artificiali (Monte Testaccio, Monte Savello, Monte Citorio, Monte Giordano) e le aree depresse lacustri (*Palus Caprae* e *Lacus Curtius*).

Ai riporti è dedicato il prossimo paragrafo: essi rappresentano una spessa coltre che ricopre in modo praticamente continuo l'area del centro storico, risultato dell'accumulo millenario dei detriti dovuti a distruzioni e ricostruzioni, alla bonifica delle aree paludose, una vera e propria formazione geologica artificiale che merita una trattazione a parte per le sue peculiarità.

Figura 18: "Carta fisica del suolo di Roma, ne'primi tempi della fondazione di questa città"di G.B. Brocchi, su base topografica di G.B. Nolli, georiferita.

La conformazione geologica dell'area romana, in sinergia con l'attività antropica millenaria è responsabile di molti dei fattori di pericolosità incidenti sul territorio stesso.
Nel territorio romano sono presenti seppure con intensità non significativa, molti dei pericoli e pericolosità illustrati nel paragrafo precedente. La popolazione romana ha sofferto nella sua storia numerose alluvioni del Tevere, frane, crolli di cavità sotterranee, fenomeni vulcanici secondari ed il patrimonio monumentale è stato spesso lesionato da terremoti. Considerando le pericolosità ed i pericoli incidenti sul territorio della città di Roma, ci si rende conto che sono molteplici e mostrano una distribuzione geografica non casuale, ma si concentrano in funzione della geologia del territorio. Attualmente (Fig. 19) il territorio della città può essere preliminarmente diviso in quattro zone distinte per caratteristiche geologiche, per sviluppo urbano e per differente incidenza e tipologia delle pericolosità naturali (da Funiciello & Cologgi, 2008):
ZONA I: valle alluvionale relativa al reticolo idrografico del Tevere;
ZONA II: destra idrografica del Tevere, dorsale Monte Mario-Gianicolo;
ZONA III: plateau vulcanico e sinistra idrografica del Tevere;
ZONA IV: area del delta del Tevere.

Nella ZONA I i depositi alluvionali recenti del Tevere costituiscono la formazione geologica principale con spessori massimi fino a 60 metri nel centro della valle. La successione stratigrafica mostra depositi conglomeratici basali ai quali succedono sabbie, limi ed argille localmente ricche in materia organica, con caratteristiche geotecniche scadenti. Tali litologie e caratteri litotecnici hanno prodotto una pericolosità connessa all'elevata compressibilità con fenomeni di cedimento differenziale degli edifici ed una

pericolosità sismica locale non trascurabile. Notevoli danneggiamenti a strutture in seguito a cedimenti del terreno si sono registrati lungo il paleofosso di Grotta Perfetta, in via Giustiniano Imperatore, dove su diverse palazzine sono evidenti lesioni strutturali. Lo sviluppo urbano disomogeneo nel tempo e nello spazio, ha fatto si che i terreni alluvionali del centro storico della città siano stati consolidati dal carico degli edifici costruiti in passato e che tale pericolosità non sia presente in questa area. Per quanto riguarda la pericolosità sismica locale, i depositi alluvionali producono delle amplificazioni locali tali da avere risentimenti significativi sugli edifici per terremoti di origine appenninica. In seguito al terremoto di Avezzano del 1915, numerosi edifici del centro storico sono rimasti danneggiati e sono numerosi gli studi che mettono in evidenza il danneggiamento differenziale di aree del centro storico (vedi in 2.3.3.1 esempio della Colonna Traiana e Colonna Antonina).

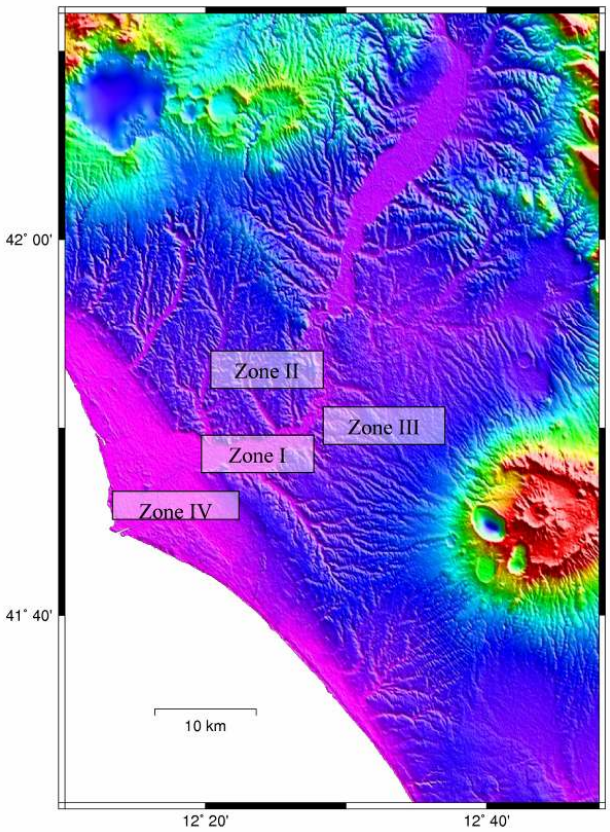
E' invece praticamente nullo o certamente accettabile il pericolo di esondazione, risolto con la costruzione degli argini e la riduzione dei trasporto solido del Tevere.

Nella ZONA II, costituita dalla riva destra idrografica, si registra l'incidenza di fenomeni franosi, relativi alla presenza di pendenze non di equilibrio di materiali limosi, sabbiosi ed argillosi di origine continentale, frane rotazionali e complesse, spesso innescate durante periodi di piogge intense a causa del pessimo drenaggio delle acque superficiali. Eclatanti sono i casi di via Ugo Bassi, via Labriola e Villa Sciarra nel quartiere di Monteverde vecchio (Amanti *et alii* 1995).

In sinistra idrografica, dai sette colli fino alle pendici del vulcano laziale, si individua la ZONA III, un tavolato a bassa pendenza di materiale vulcanico eterogeneo per composizione e modalità di messa in posto, fortemente inciso dai paleofossi del Tevere.

Il materiale vulcanico, pozzolane e tufi di origine prevalentemente dei Colli Albani, è stato diffusamente utilizzato dagli antichi Romani ed estratto con cave sotterranee, a cielo aperto o cunicoli. Tale attività estrattiva congiunta alla presenza di una fitta rete di catacombe lungo le principali vie consolari di Roma, ha originato un pericolo di crollo legato alle cavità che pervadono il sottosuolo della città (Sciotti 1982, 1984). Cave e catacombe in materiali non vulcanici, ma in ghiaie e sabbie sono presenti in riva destra e hanno causato dissesti in viale Tiziano, con il recente crollo di materiale dal Colle di Monti Parioli (Amanti *et alii* ,2008). La presenza di materiale vulcanico produce inoltre una pericolosità relativa al decadimento radioattivo degli isotopi del Radon contenuti nei minerali vulcanici e si rileva nell'area prossima al vulcano laziale la presenza di flussi di CO_2 ed altri gas di

origine vulcanica in concentrazioni da rendere necessario un monitoraggio continuo (Barberi *et alii*. 2007).



Zone I
Valle alluvionale del Tevere: dal danneggiamento dei monumenti nel centro storico (amplificazione sismica locale) al caso di via Giustiniano Imperatore (subsidenza)

Zone II
Area in sinistra idrografica del Tevere corrispondente all'estensione dei sette colli con problemi di stabilità delle formazioni rocciose

Zone III
Plateau vulcanico e rischio legato ad emissione/radiazione di gas

Zone IV
Delta del Tevere e sviluppo urbano recente, problemi relativi ad erosione della costa e salinizzazione delle falde

Figura 19: Suddivisione del territorio del comune di Roma in quattro zone differenti per caratteristiche geologiche, geotecniche e geomorfologiche che hanno determinato l'incidenza di specifiche pericolosità per ciascun settore e hanno indirizzato la crescita urbanistica della città nel corso della storia (da Funiciello & Cologgi 2008).

Infine la ZONA IV, relativa ai depositi di delta tiberino, è un'area in continua evoluzione per il riequilibrio erosione-sedimentazione definito dagli apporti del Tevere e dalle correnti costiere. I principali pericoli riscontrati sono quello relativo all'erosione delle coste, dovuto agli scarsi apporti di sedimenti del Tevere in seguito alla sua sistemazione idraulica, e quello relativo al cuneo di acqua salina che avanza negli acquiferi costieri (Capelli & Mazza 2008).

Su tutto il territorio urbano si risente invece la pericolosità legata a fenomeni di inquinamento delle falde e dei suoli da parte di metalli pesanti.

Le condizioni di criticità riferite alle diverse pericolosità sono spesso correlate agli utilizzi e/o agli sviluppi urbanistici non corretti. Il più delle volte si tratta di eventi provocati dall'uso improprio del territorio, dal suo abbandono o dalla mancata attuazione di interventi preventivi.

Lo sviluppo urbanistico della città durante i secoli e in particolar modo nel '900 è stato dettato esclusivamente da esigenza politiche ed economiche come si evince analizzando i piani regolatori dal 1909 agli anni 1960. La città dal suo centro storico si è espansa a 360 gradi verso le sue periferie, edificando circa il 40% del territorio comunale. La distribuzione dell'edificato sulle diverse litologie presenti sul territorio romano (Tabella 4) mette in evidenza come non ci sia stata una pianificazione territoriale improntata su una valutazione dei caratteri geologico e geotecnici dei terreni presenti (Funiciello & Cologgi, 2008).

Tale gestione territoriale ha portato a dover affrontare quindi molte delle pericolosità citate in modo riparatore piuttosto che preventivo, aumentando i costi e creando situazioni di emergenza. Nell'ultimo piano regolatore approvato il 12.02.2008 recepisce la necessità di una pianificazione che tenga conto anche delle caratteristiche geologiche e geotecniche delle aree coinvolte dal piano.

	Distribuzione litologie nell'area del comune di Roma		Distribuzione litologie all'interno del Grande Raccordo Anulare		Distribuzione litologie nel settore urbanizzato all'interno del GRA	
	km^2	%	km^2	%	km^2	%
Depositi Olocenici (a)	85.6	24.9	38.5	21.9	47.1	28
Depositi Vulcanici (b)	213.3	62.0	117.2	66.7	96.2	57.2
Depositi Continentali (c)	43.2	12.6	18.7	10.7	24.5	14.6
Prodotti Marini (d)	1.6	0.5	1.3	0.7	0.3	0.2
TOTALE		100		100		100

Tabella 4: Confronto della distribuzione delle litologie nell'area di Roma, all'interno del GRA e nella parte urbanizzata (da Funiciello & Cologgi 2008)

Nei prossimi paragrafi si approfondiscono i principali pericoli presenti nella città e se ne illustrano le peculiarità, fornendo lo stato dell'arte degli studi a riguardo.

2.3.2 I terreni di riporto

Roma, più che altre città storiche, presenta un accumulo millenario di detriti sulla sua superficie urbana, in particolare se consideriamo il centro storico. Il Monte Testaccio ne rappresenta la più tipica testimonianza, chiamato Monte dei Cocci per essere prevalentemente costituito dall'accumulo dei frammenti di anfore olearie destinate ai

negozi e sbarcate dal vicino porto fluviale lungo il Tevere. La Piramide Cestia al limite del centro storico, la Chiesa di San Vitale in via Nazionale, sono a decine di metri sotto l'attuale piano di calpestio: tali strutture si trovano alla quota originaria del piano di calpestio, rispettivamente, del 12 a.C. e dell'epoca medievale. Intorno ad esse si sono accumulati spessori fino a 10 metri di terreni di riporto che hanno elevato la superficie topografica.

I detriti accumulati, costituiti da materiale assai eterogeneo per natura, dimensioni e grado di compattazione, formano i terreni di riporto, cioè terreni la cui messa in posto è stata determinata dall'uomo. Nei depositi antropici si può trovare di tutto: materiale naturale in ogni granulometria ed origine, scarti di cava, manufatti e frammenti di laterizi, cocci, resti di edifici, alternato a depositi delle alluvioni storiche del Tevere. La tessitura può essere caotica o stratificata, più o meno consistente o addensata. Caratterizzare un deposito antropico è complesso, ma al suo interno si possono trovare testimonianze archeologiche importanti.

Un tentativo di classificazione dei terreni di riporto è stato proposto da Rosenbaum *et alii* (2003), in funzione dell'origine del materiale, utilizzando un'apposita tabella gerarchica di classificazione (Mc Millan & Powell 1999). Gli autori sottolineano l'esigenza di un'analisi del terreno specifica, condotta attraverso dati di rilevamento, dati di sondaggio, dati interpretati di *remote sensing*, campionamento per analisi geochimiche del suolo e dati geotecnici.

Dal punto di vista ingegneristico essi rappresentano un problema in quanto proprio per la loro variabilità hanno un comportamento geomeccanico scadente. I terreni di riporto sono presenti nella città con spessori variabili.

I terreni di riporto hanno modificato sostanzialmente la morfologia della città ed obliterato molti corsi d'acqua dell'antico reticolo idrografico. Molte delle principali vie del centro, per esempio via Labicana, via Cavour, via del Tritone, seguono i percorsi ormai sepolti degli affluenti del Tevere che scorrevano tra i sette colli (Fig. 20).

Caso esemplare di dissesto connesso ai riporti è il caso di Palazzo Valentini, situato a nord della Colonna Traiana ed oggi sede della Provincia di Roma, che poggia su spessori variabili da 6 a 16 m di riporti, i quali hanno causato cedimenti differenziali della struttura.

Dopo il lavoro di Brocchi del 1820, che dà indicazioni precise sui terreni di riporto ne centro storico, il primo studio specifico sui terreni di riporto si rinviene in Ventriglia (1971), dove si ha una descrizione dei principali caratteri tipologici e geotecnici, suddividendoli in base alle proprietà attritive piuttosto che coesive. Fondamentale è stato la

produzione da parte di questo autore di una carta degli spessori dei riporti nell'area urbana, primo documento cartografico rilevante sugli spessori di questa unità litotecnica. In seguito una carta degli spessori dei riporti relativa al centro storico venne presentata nel 1995 da Marra & Rosa, con ulteriori e più recenti dati stratigrafici.

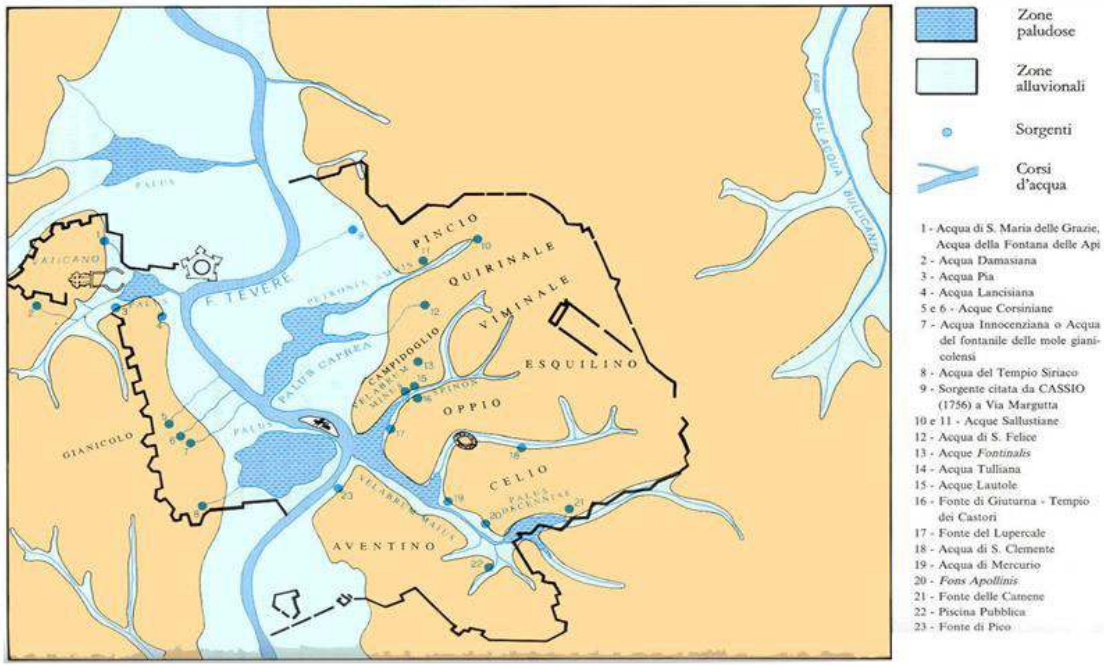


Figura 20: Caratteri idrografici originari del centro storico di Roma (da Corazza & Lombardi 1995)

Ultimamente lavori con metodologie innovative di tipo GIS associato all'interpretazione e confronto della cartografia storica con quella attuale, sono stati proposti da diversi autori in settori specifici della città (Funiciello *et alii* 2004, Testa *et alii* 2008) per ottenere una quantificazione delle modificazioni topografiche avvenute nell'area urbana in termini di spessori di materiale accumulato od asportato.

In Funiciello *et alii* (2004) si mette in evidenza la differenza tra i riporti in destra idrografica, nel dettaglio l'area di Prati, soggetta ad interventi urbanistici tra l''800 e il '900, e quelli in riva sinistra in particolare nell'area di Campo Marzio, in cui si svilupparono i più intensi piani urbanistici di Roma antica. Ricostruendo gli spessori tramite numerosi sondaggi vennero individuati spessori medi di riporti di 7-8 m per l'area di Prati con un massimo di 25 m, mentre nell'area di Roma antica gli spessori medi erano di 10 m con massimo di 30 m.

Nello stesso lavoro è presentato un modello dell'aumento storico dello spessore dei riporti costruito su dati stratigrafici e storico-archeologici, che mostra come dalla quota

morfologica originaria di 8-9 m si sono raggiunti gli attuali 19-20 m slm del piano di calpestio (Fig. 21).

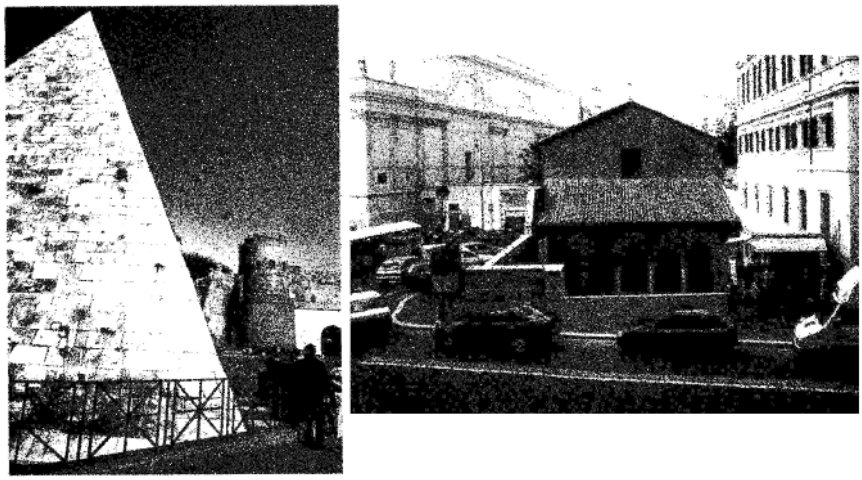


Figura 21: La Chiesa di San Vitale presso via Nazionale (a destra), e la Piramide Cestia presso le Mura Aureliane (a sinistra): il piano di calpestio originario in entrambe i casi si trova diversi metri al di sotto di quello attuale.

Una importante conseguenza dell'accumulo storico dei riporti è l'incremento del carico indotto sui depositi alluvionali tiberini; si stima per l'area di Campo Marzio una tensione efficace indotta di circa 130 kPa che hanno determinato nel tempo una consolidazione dei sedimenti alluvionali sottostanti (Funiciello *et alii* 2004). Gli rilevamenti interferometrici confermano quanto visto nell'area di Campo Marzio: i depositi alluvionali in funzione del carico dei riporti e degli edifici protratto da centinaia di secoli risultano praticamente consolidati nell'area del centro storico. Al contrario delle aree periferiche di recente urbanizzazione, i depositi del centro storico risultano aver esaurito la curva edometrica dei cedimenti. Ben diversa è la consolidazione dei depositi alluvionali a sud e a nord del centro storico, ancora fortemente compressibili. La tematica della subsidenza geotecnica e del pericolo ad essa associata, verrà discusso più avanti nel paragrafo dedicato.

Anche in epoca recente ed in particolare negli anni successivi al secondo dopoguerra, in seguito al boom economico ed alla forte espansione edilizia, si effettuarono il riempimento di paleofossi per permetterne l'edificazione. Ne sono esempio l'area di via Giustiniano Imperatore edificata sulla piana del Fosso di Grotta Perfetta, Via Isacco Newton alla Magliana Nuova coincidente con il Fosso di Papa Leone, via dell'Affogalasino sull'omonimo fosso. Tali "ritombamenti" hanno causato non pochi problemi agli edifici dei quartieri ivi edificati e allo scorrimento delle acque superficiali e di frequente capitano dissesti relativi al sottodimensionamento delle opere di drenaggio e all'eccessiva impermeabilizzazione del suolo.

Dal punto di vista idrogeologico, i terreni di riporto ospitano delle falde sospese ricaricate dalle acque piovane, da eventuali perdite nella rete idraulica, idrica e fognaria, dalle numerose sorgenti localizzate ai piedi dei rilievi collinari ed attualmente sepolte dai riporti stessi (Corazza *et alii* 2004). Infatti la permeabilità di questa unità è medio-elevata, ma estremamente variabili lateralmente e verticalmente. Di frequente depositi permeabili si alternano ad altri praticamente impermeabili.
L'unità dei terreni di riporto è quindi per il territorio della città, una formazione geologica a tutti gli effetti: ha caratteristiche stratigrafiche, proprietà geotecniche ed idrogeologiche peculiari, presenta una continuità nella distribuzione areale e degli spessori a volte considerevoli, unità complessa di cui tenere conto sia al momento di interventi nel sottosuolo sia per la pericolosità indotta sulle strutture superficiali e sotterranee.

2.3.3 Pericolosità sismica

La sismicità dell'area romana è di modesta entità e sebbene la città di Roma presenti una notevole sismicità storica, essa è connessa probabilmente solo alla sua importanza politica in quanto i terremoti risentiti non hanno superato il VII-VIII grado della scala MCS – Mercalli Cancani Sieberg (Ambrosini *et alii* 1986, Molin *et alii* 1986, Basili *et alii* 1987, 1989). Sostanzialmente però la pericolosità sismica dell'area romana è moderata ma non trascurabile e in base all'OPCM n. 3274 del 20.03.2003 il territorio di Roma è passato dalla classe 4, ossia nessuna accelerazione al suolo, alla classe 3 (Fig. 22), dove l'accelerazione al suolo prevista è pari a 0.15 PGA (*Peek Ground Acceleration*).
Recenti studi mostrano tre diverse sismicità ricorrenti nell'area romana (Molin *et alii* 1995): (1) sismicità appenninica. in cui i terremoti sono causati dalla tettonica ancora attiva legata alla fase post-collisionale dell'orogene appenninico, con terremoti di elevata energia e ipocentri profondi; (2) sismicità locale, legata all'attività sismica tipica delle aree vulcaniche attive coincidente con l'area dei Colli Albani (Amato *et alii* 1984) caratterizzati da ipocentri superficiale, bassa-bassissima energia ed elevata frequenza, caratteri tipici dello sciame (Mogi 1963); e (3) sismicità urbana legata alla modesta sismicità propria dell'area romana. I massimi risentimenti sono associati ai terremoti di tipo regionale, generati nelle aree sismogenetiche dell'Appennino centro-meridionale, distanti tra i 60 e i 130 km dalla città di Roma. Il più significativo per l'entità degli effetti fu il terremoto di Avezzano nel 1915 a 110 km di distanza. Anche i principali terremoti della sequenza

dell'Umbria-Marche 1997-98, di cui il più forte di magnitudo 5.7 con ipocentro a 10 km di profondità, sono stati risentiti dagli edifici e dai cittadini romani (Cifelli *et alii* 1999, 1999a, b, 2000, Donati *et alii* 2008). I tempi di ritorno sono valutati di circa 100 anni per i terremoti appenninici di magnitudo 5 e di 500 anni per quelli di magnitudo 7.

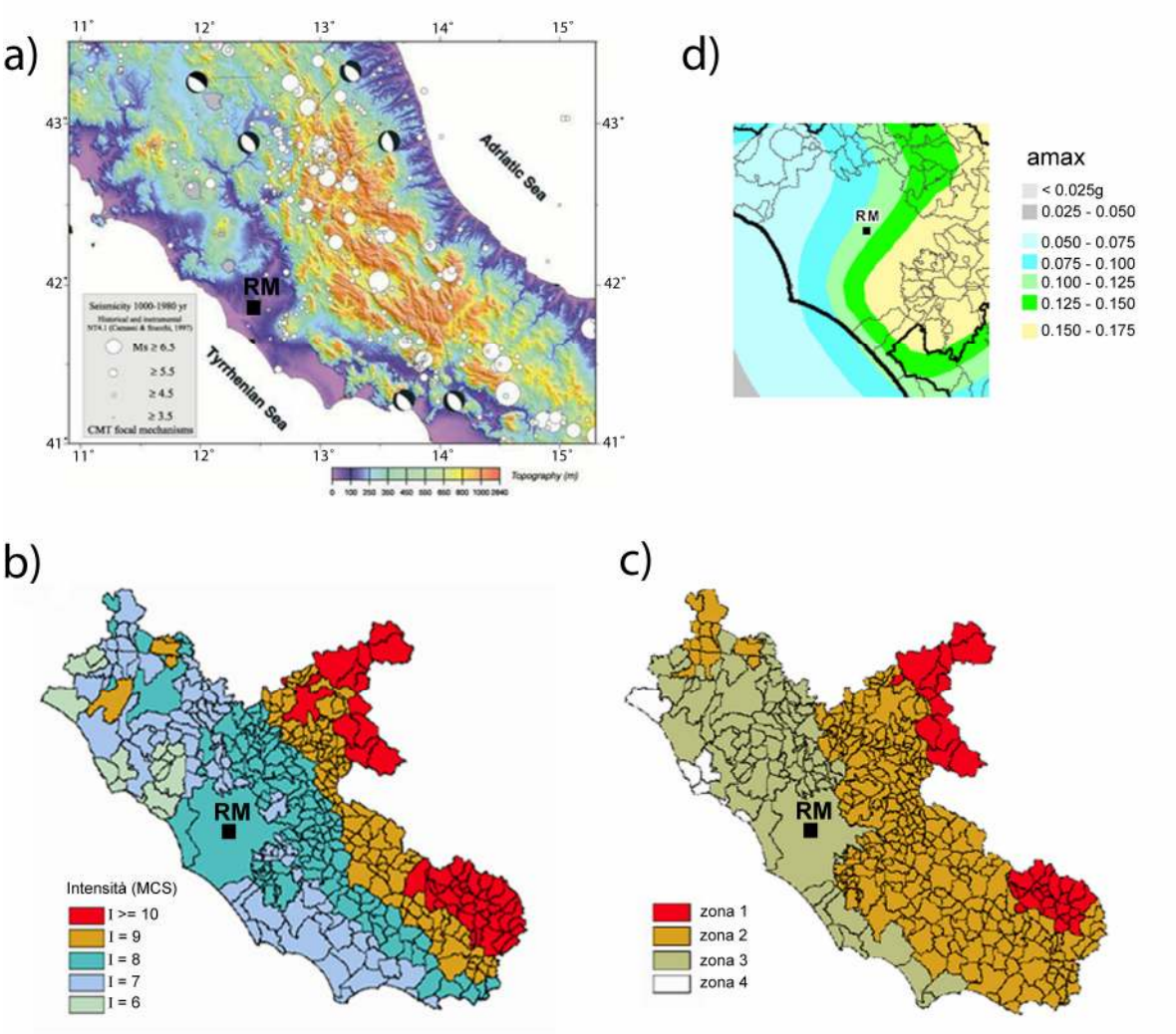


Figura 22: a) Distribuzione e magnitudo dei terremoti che si risentono nela capitale; b) Mappa della distribuzione delle maggiore intensià macrosismiche che si sono risentite nei comuni del Lazio negli ultimi 1000 anni; Roma ha un valore di intensità della scala Mercalli-Cancani-Sieberg pari a 8; c) nuova classificazione sismica del Lazio secondo i criteri contenuti nell'OPCM 3274 del 2003; la zona 1 è quella con massima pericolosità sismica; il territorio del Comune di Roma è classificato come zona 3, quindi con pericolosità sismica non nulla; d) mappa della pericolosità sismica (OPCM 3274) per il Comune di Roma espressa in termini di accelerazione massima del suolo (amax, PGA) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli molto rigidi (v_s>800 m/s).

Esiste anche una sismicità *offshore*, nei settori costieri della regione Lazio legata a strutture trasversali tirreniche; si fa riferimento alla scossa del terremoto del 22.08.2005 localizzato

a largo di Anzio di magnitudo 4.5 e profondo 30 km, risentito ma senza conseguenze nei centri urbani lungo il litorale e anche nel settore meridionale della capitale.

A fronte di una sismicità modesta, il patrimonio monumentale della città ha risentito in modo significativo degli eventi sismici. Numerosi studi macrosismici (Molin *et alii* 1995, Funiciello *et alii* 1998, Donati *et alii* 1999, 2008) hanno mostrato il danneggiamento spesso serio del patrimonio storico monumentale della città ed una distribuzione di tali lesioni in corrispondenza di depositi alluvionali (Cifelli *et alii* 1999a, b, 2000). Una sempre più dettagliata conoscenza della natura litologica-stratigrafica e geotecnica dei terreni romani (Ventriglia 1971, 2002, Conato *et alii*. 1980, Marra & Rosa 1995, Funiciello *et alii* 1998, Corazza *et alii* 1999, Bozzano *et alii*. 2000, Funiciello & Giordano 2008 – Carta geologica Foglio Roma 1:50,000 con carte del rilevamento 1:10,000), insieme agli studi di risposta locale e modellazione numerica (Fah *et alii*. 1993, 1995, Rovelli *et alii*. 1994, Vaccari *et alii.* 1995) hanno individuato nella valle del Tevere e nelle paleovalli, spessori di sedimenti alluvionali scadenti dal punto di vista geotecnico e dimostrato che la forma di tali valli e il contrasto di impedenza tra il bedrock pliocenico e i depositi recenti comportano l'esistenza di fenomeni di risonanza tipici di basse frequenze comprese tra 1-3 Hz, amplificazione ed effetti di bordo. Nelle valli il segnale sismico rimane come intrappolato e persiste in modo più duraturo e amplificato (Rovelli *et alii* 1995).

2.3.3.1 *Fenomeni di amplificazione sismica*

La complessità geologica e la variabilità delle caratteristiche geomeccaniche dei suoli possono essere responsabile di effetti di amplificazione locale nel moto del suolo durante un terremoto. In occasione di molti terremoti sono stati osservati effetti di sito significativi che hanno prodotto incrementi dell'intensità, dei danni e delle vittime, soprattutto laddove la geologia di superficie passava in modo repentino da substrato roccioso assimilabile al *bedrock* a depositi alluvionali incoerenti. Un esempio è il terremoto catastrofico che colpì Mexico City nel 1985, posta a 300 km di distanza dall'epicentro e fondata su sedimenti lacustri.

Per quanto riguarda la città di Roma sono numerosi gli studi qualitativi che mostrano una stretta correlazione tra i danneggiamenti avvenuti durante i maggiori terremoti storici risentiti a Roma e i depositi alluvionali recenti del Tevere (Ambrosini *et alii* 1986, Molin & Guidoboni 1989, Cifelli *et alii* 1999). Simulazioni numeriche del moto del suolo atteso

per un forte terremoto appenninico (Rovelli *et alii*. 1994) hanno indicato nella città di Roma accelerazioni massime in corrispondenza dei terreni alluvionali e lungo i bordi della valle. Le fonti storiche scritte, gli studi macrosismici e i dati geoarcheologici riportano numerosi casi di danni al patrimonio storico artistico in seguito a terremoti, prevalentemente originatesi nell'Appennino centrale. La maggior parte degli edifici nel centro storico presenta lesioni di origine sismica, in parte dovuti anche alle condizioni di vetustà e vulnerabilità strutturale. Circa l'80% degli effetti di maggior gravità si è verificato in corrispondenza dei depositi alluvionali olocenici (Donati *et alii* 2008). Gli esempi più noti di danneggiamento sismico a Roma sono quelli del Colosseo e della Colonna di Marco Aurelio.

Nel caso dell'anfiteatro Flavio è stato ricostruito in modo dettagliato le caratteristiche geologiche e geotecniche del sottosuolo del monumento (Bozzano *et alii* 1995), ubicato lungo la valle sepolta del Fosso Labicano, affluente minore del Tevere. Il monumento risulta lesionato in modo non omogeneo, in particolare è la parte meridionale dell'anello esterno ad essere crollata durante un terremoto. Le analisi stratigrafiche hanno mostrato che la porzione meridionale poggia sulle alluvioni oloceniche poco consolidate del paleofosso. Tali differenza di consolidazione tra il deposito alluvionale e le argille plioceniche alla base hanno determinato un contrasto di impedenza significativo e le simulazioni numeriche 2D (Mozco *et alii* 1995, Rovelli *et alii* 1995a) hanno confermato la possibilità di fenomeni di risonanza bidimensionale della valle, con un moto sismico del suolo caratterizzato da una ampiezza, spostamento differenziale e durata maggiore della parte settentrionale.

Gli studi condotti invece sulla Colonna di Marco Aurelio e soprattutto sul differente stato di conservazione tra questa e la colonna di Traiano (Boschi *et alii* 1993). Le due colonne imperiali, praticamente identiche nella struttura architettonica, età, dimensione e materiali distano solo 700 metri, ma la cosiddetta Colonna Antonina sita in Piazza Colonna mostra una evidente traslazione dei rocchi a differenza della Colonna Traiana, sita nell'omonimo Foro, che risulta praticamente integra. L'analisi dei caratteri stratigrafici e la modellazione numerica della risposta sismica locale hanno confermato la tesi che individuano nelle azioni sismiche la causa del deterioramento della Colonna di Marco Aurelio. La modellazione numerica della risposta di sito ha evidenziato una significativa amplificazione spettrale attorno ad una ristretta banda di frequenza di 1-1.5 Hz, coincidente con il moto di vibrazione naturale della colonna. La Colonna Traiana si trova invece sul bedrock vulcanico (Donati *et alii* 1999, 2000).

Risulta quindi molto interessante e con importanti risvolti per la salvaguardia del patrimonio monumentale della città storica e per la tutela dei manufatti edificati nelle paleovalli ormai seppellite dai riporti, condurre studi per la caratterizzazione sismica dei terreni alluvionali ed investigare dal punto di vista dinamico la coltre dei riporti stessa. I riporti costituiscono un deposito vero e proprio, esteso su tutta la città, molto eterogeneo nella natura, struttura e proprietà geomeccaniche, ma soprattutto non trascurabile in quanto raggiunge spessori di oltre 30 metri in alcuni settori del centro storico.

2.3.4 Pericolo di crollo per cavità antropiche

Di crollo connesso a cavità antropiche se ne è occupato il Convegno organizzato dall'APAT, attuale INSPRA, e dalla Protezione civile nel 2004, illustrando il censimento effettuato sui *sinkholes*, sia di origine naturale sia di origine antropica. In tutta Italia si rilevano casi di apertura improvvisa di voragini in ambito urbano e hanno una incidenza di molto maggiore rispetto a quelli di origine naturale, sebbene abbiano un'estensione più limitata (Corazza 2004). Le città maggiormente colpite da questa tipologia di dissesti risultano essere Roma e Napoli.

Le cavità nella città di Roma hanno una storia antichissima. La prima voragine della storia viene descritta da Tito Livio e risale al 361 a.C.. Le cavità sotterranee romane sono tutte di origine artificiale, incluse quelle formatesi ad opera di processi erosivi provocati dal mal funzionamento di opere civili quali costruzioni sotterranee, fognature, sottoservizi ed opere urbanistiche. Roma è attraversata da gallerie prodotte dall'attività di cava nelle pozzolane, nei tufi e subordinatamente, in ghiaie e sabbie; inoltre sono diffuse le gallerie relative ai cunicoli drenanti ed alle catacombe, legati alla lunga storia della città (Tabella 5). Per quanto riguarda le cave in sotterraneo, esse si sono sviluppate con il metodo di scavo a camere e pilastri. Le cavità sotterranee possono essere caratterizzate da andamenti plano-altimetrici molto diversi ed è tramite le ispezione televisive, ricerche con metodi geofisici ed ispezioni speleologiche che si può tentare di ricostruire la loro estensione. Si possono infatti presentare come lineari ed isolate o ramificarsi anche su più livelli e costruire delle rete caveali di estensione anche notevole.

Tipi di vuoto nel sottosuolo	numero
Cave	94
Catacombe	67
Altre cavità d'interesse archeologico	155
Cunicoli idraulici, acquedotti e fognature	131

Tabella 5: Quadro generale della tipologia dei vuoti nel sottosuolo di Roma, frutto di attività antropica (da Cerlesi 1999)

Il dissesto è correlato all'evoluzione dinamica delle cavità e spesso al loro degrado. Il rischio si manifesta nel momento in cui le cavità rendono instabili i manufatti posti al di sopra e nei casi peggiori li coinvolgono nel loro crollo. Piuttosto spesso, si verificano voragini e frane in corrispondenza di queste cavità, coinvolgendo le sedi stradali, provocando l'interruzione della viabilità e delle reti dei sottoservizi nonché mettendo in pericolo la salvaguardia della popolazione legata alla stabilità degli edifici sovrastanti.

Attualmente, altre interazioni negative si realizzano fra le gallerie e le reti idriche e fognarie, spesso fatiscenti e con frequenti perdite di liquami.

Una delle maggior difficoltà nella valutazione di tale pericolo è l'assenza di memoria dell'ubicazione di tali cavità, coincidente con l'intensa espansione edilizia degli anni 50-70, che ha permesso il costituirsi del tessuto urbanistico al di sopra di tali gallerie, non sempre con le opportune tipologie fondazionali.

Le aree interessate dalla presenza di cavità sono prevalentemente quella orientale, settentrionale e meridionale della città, dove vi sono depositi piroclastici pozzolanacei del Vulcano Laziale, anche se non mancano segnalazioni in corrispondenza delle vulcaniti del Vulcano Sabatino. Le cave relative a coltivazioni di depositi di ghiaie e sabbie, meno frequenti, sono presenti lungo la Via della Magliana ed in alcuni settori nord occidentali di Roma, lungo la Valle tiberina.

I primi studi di dettaglio sulle cavità nel territorio romano risalgono a De Angelis D'Ossat (1932, 1933, 1935, 1937, 1940a, b) che ha descritto le caratteristiche geometriche, tipologiche e geologiche delle catacombe situate lungo le principali vie consolari. Il successivo lavoro sistematico sulle cavità, con molti dati ripresi da De Angelis D'Ossat, è di Ventriglia (1971, 2002) il quale presenta oltre alla mappatura di alcuni ipogei relativi a reti caveali pertinenti a catacombe o cave, la prima cartografia sull'ubicazione delle cavità sotterranee in Roma. Nel 1995 Crescenzi *et alii* presentano un elenco dettagliato degli ipogei ed una carta delle cavità aggiornata al centro storico. Una cartografia specifica sul pericolo relativo alle cavità è realizzata da Sciotti nel 1999 in seguito all'incarico da parte del Comune di Roma. Tale cartografie copre a scala 1:20000 l'intero comune di Roma e

1:10000 l'area del Centro Storico; non viene fornita una valutazione del rischio di crollo, ma un inventario delle principali tipologie di cavità e la probabilità associata ad una certa area di ospitare delle cavità sotterranee in base a considerazione geologiche dirette, geofisiche indirette e segnalazioni storiche.

Il primo studio significativo e fondamentale per la valutazione di stabilità di reti caveali è da riferirsi a Bernabini *et alii* 1965-66 che nell'ambito di uno studio applicato nell'area delle Tre Fontane di Roma, presenta un modello di valutazione del rischio di crollo basato sull'individuazione di elementi geometrici e di rilevamento di lesione dei pilastri che descrivono 5 classi di stabilità dei pilastri stessi. Studi mirati alla valutazione del rischio di crollo di ipogei proseguono dagli anni '80 e sono di carattere geologico e geotecnico (Sciotti 1982, 1984a, b, Lembo Fazio & Ribacchi,1990).

Studi ulteriori sull'analisi del rischio di crollo e delle problematiche di indagine si trovano in Lanzini (1995). Mazza *et alii* (2001, 2008) propone un modello di valutazione del rischio che correli gli aspetti geologici, geotecnici e geometrici delle cavità con gli aspetti insediativi, in particolare reti di sottoservizi e tipologie fondazionali degli edifici. Specifici studi sono stati condotti sulle cavità del Colle Aventino (Santoro *et alii* 2002) e Federico & Screpanti (2002) hanno proposto un modello di stabilità degli ipogei ad elementi finiti.

2.3.5 Pericolosità idrogeologica

Nell'ambito della pericolosità idrogeologica, la città di Roma nel corso della sua storia è stata oggetto di numerose inondazioni e sono molteplici gli eventi che interessano la stabilità dei pendii, sebbene sempre in aree di estensione limitata.

Dal punto di vista idraulico la città ha sperimentato le esondazioni del Tevere a partire dal tempo dei Romani fino alla prima meta del XX secolo. In seguito a quegli eventi ci furono danni agli edifici, perdita di vite umane e venne favorito il propagarsi di epidemie.

Dall'Unità di Italia si iniziò una campagna di interventi sistematici, atti alla mitigazione del rischio. Furono fatti costruire gli argini, i ben noti muraglioni; si rimossero alcuni ponti e i mulini ad acqua che creavano ostacolo all'onda di piena, favorendo turbolenze ed infine vennero realizzate alcune dighe a nord della città di Roma (Castel Giubileo, Corsara) per regolare gli eventi di piena più critici. Tali misure idrauliche furono sostanzialmente efficaci. Attualmente il pericolo esondazione è affrontato in modo quantitativo e puntuale

nel Piano di Bacino dell'Autorità di bacino del Fiume Tevere, ma è ridotto a circoscritte aree della città in posizione depressa.

Una conseguenza negativa della riduzione dell'apporto torbido del fiume Tevere è stata la conseguente erosione delle coste lungo il litorale cittadino.

Studi riguardo le piene storiche, i caratteri idrodinamici del Tevere sono stati condotti da autori diversi (Bencivenga *et alii* 1995, Funiciello *et alii* 2005).

Dal punto di vista della stabilità di pendio, la città di Roma non è caratterizzata da fenomeni franosi diffusi e di elevata intensità, (Amanti *et alii* 1995, 2008) in quanto i versanti sono costituiti da depositi plio-pleistocenici dotati di discrete caratteristiche geotecniche.

Per quanto riguarda le pendenze, le fasce altimetriche più elevate si riscontrano nel settore occidentale, in destra idrografica del Tevere, dove ci sono gli spettacolari belvedere della città lungo la dorsale Monte Mario–Gianicolo-Monteverde. In questo settore si sono verificati nel tempo diversi eventi franosi localizzati. In particolare il quartiere di Monteverde Vecchio sono segnalati fin dall'inizio del secolo scorso dissesti di versante (Fossa Mancini 1922). Negli anni '70 lo stesso terrazzo del Gianicolo fu interessato da dissesto. Tra i vari eventi franosi è significativo il caso della frana di via Saffi (1963) che ha interessato i depositi sabbiosi della formazione di Monte Mario, impostati sulle argille plioceniche, e dei sovrastanti conglomerati della formazione di Ponte Galeria, facendone crollare un settore dei bastioni di Villa Sciarra; ulteriori dissesti superficiali, tuttora attivi, sono presenti lungo via Dandolo e lungo gli acclivi versanti di via Dall'Ongaro (Sciotti 1986, Leone 1986). Per il quartiere di Monteverde sono presenti studi relativi agli aspetti geologici, idrogeologici e geotecnici in Corazza *et alii* (2002). Per Monte Mario si segnala il lavoro di Brancaleoni *et alii* (2003).

Casi di frane si registrano anche nella zona dei Monti Parioli lungo viale Tiziano, angolo via Maresciallo Pilsudski, di cui la più recente a Novembre 2007 e nel settore dei sette colli, al Campidoglio con fenomeni di frana di crollo parziale della Rupe Tarpea (1991).

Le frane dl territorio di Roma sono state censite secondo la metodologia indicata nel progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) è stata presentata nel Convegno Progetto IFFI dall'attuale INSPRA (Amanti 2005, APAT 2007) in cui si evidenzia che i fenomeni franosi della capitale sono complessi ma circoscritti, legati sopratutto al degrado ed all'incuria dell'uomo, nonché all'entità degli eventi piovosi.

2.3.6 Pericolosità di subsidenza geotecnica e cedimenti

Per fenomeni di subsidenza si intendono lenti sprofondamenti di ampie aree e le cause risiedono principalmente nella estrazione di fluidi o più in generale l'abbassamento verticale di un'area più o meno grande della superficie terrestre.
I cedimenti sono invece abbassamenti più o meno rapidi e localizzati legati al processo di consolidazione dei terreni. A Roma il caso di via Giustiniano Imperatore nell'XI Municipio è esemplare sia dal punto di vista geologico-geotecnico, sia per la risposta delle istituzione nel trovare soluzioni al dissesto. Via Giustiniano Imperatore percorre la valle alluvionale del Fosso di Grotta Perfetta, ormai sepolta, su cui si ergono palazzine di 8-9 piani. La valle, lunga una decina di chilometri con una sezione di non più di 2000 metri, è stata edificata intensamente durante il secondo dopoguerra. Molti degli edifici sono fondati sui depositi alluvionali olocenici con fondazioni non idonee. In seguito alla segnalazione di numerose lesioni agli edifici e all'inclinazione rispetto alla verticale di alcune palazzine, sono stati avviati studi approfonditi con campagne geognostiche mirate. I risultati delle indagine hanno evidenziato come i terreni alluvionali recenti dell'area urbana romana manchino di continuità laterale; la loro geometria lenticolare fa sì che gli edifici non poggino sempre sulla stessa tipologia di sedimento e siano quindi soggetti a cedimenti differenziali. La qualità dei materiali di riporto che furono utilizzati per bonificare l'area è pessima e gli stessi depositi alluvionali hanno caratteristiche geotecniche scadenti. Le argille e i limi sabbiosi che costituiscono questi depositi sono originati dall'erosione della formazione del Tavolato, depositi recenti di lahar relativi alla fuoriuscita in epoca storica del lago di Albano, interdigitati a spessori di diversi metri di materia organica torbosa, satura di acqua. Tali caratteri stratigrafici e la presenza della falda a pochi metri dal piano campagna conferiscono ai depositi alluvionali del Fosso di Grotta Perfetta una elevata compressibilità e bassa resistenza (Campolunghi *et alii* 2007, 2008).
L'amministrazione comunale è intervenuta per la mitigazione del rischio di crollo, proponendo un progetto di riqualificazione edilizia. I palazzi con le maggiori lesioni, con il consenso dei cittadini proprietari, sono stati abbattuti, prevedendone la ricostruzione in un'area meno suscettibile alla subsidenza e con una tipologia di fondazione che si attestino nel bedrock pliocenico. Altri edifici, limitrofi a questi e con lesioni hanno adottato interventi di consolidamento delle fondazioni, ottenendo però un palliativo al problema che inevitabilmente si riproporrà.

Il pericolo relativo alla subsidenza geotecnica interessa prevalentemente i depositi alluvionali dei fossi in riva sinistra del Tevere (Campolunghi *et alii* 2008).
Per quanto riguarda la subsidenza lenta di vaste aree, tale fenomeno è presente nell'area dei Colli Albani dove i forti tassi di emungimento maggiori della ricarica hanno indotto un cono di depressione nei depositi superficiali. All'eccessivo emungimento si attribuisce anche l'abbassamento notevole del livello dell'acqua nel lago di Albano.

2.3.7 Rischio vulcanico e Gas Hazard

Il settore dei Colli Albani presenta una notevole attività idrotermale e sismica, particolarmente nella zona occidentale, quella dove si è manifestata l'attività esplosiva più recente tra i 100,000 anni fa e l'Olocene, generando i crateri di Albano, Nemi, Ariccia e altri minori (Giordano *et alii* 2006).
Il maggiore pericolo vulcanico per il territorio del Comune di Roma consiste nella pericolosità legata all'emissione di gas vulcanici (Funiciello *et alii* 2003, Carapezza *et alii* 2003, Carpezza & Tarchini 2007, Anzidei *et alii* 2008). Nelle aree vulcaniche recenti, sono spesso presenti emanazioni gassose dovute a fenomeni di risalita dal magma che staziona in profondità e che tende a raffreddarsi lentamente. Nell'area dei Colli Albani e limitrofe, emissioni di gas ricorrono da tempi storici ed hanno generato situazioni di rischio sempre più elevato con l'aumentare dell'urbanizzazione del suo territorio. L'emissione avviene prevalentemente in corrispondenza di fratture o faglie, lungo le quali i gas presenti negli strati profondi risalgono più facilmente verso la superficie. Questa emissione avviene in maniera pressoché continua, ma può subire un incremento in concomitanza di eventi sismici o per cause antropiche (scavi con smantellamento del terreno superficiale, realizzazioni di pozzi). Le zone dove attualmente è in opera un monitoraggio continuo dei gas è la zona di Cava dei Selci – Santa Maria delle Mole, nel comune di Marino (Carapezza *et alii* 2003)

Un ulteriore fattore che produce l'aumento del flusso di gas emessi è costituito dall'abbassamento della falda idrica; accennato precedentemente per i fenomeni di subsidenza, lo sviluppo economico e urbanistico che ha subito l'area negli ultimi 50 anni ha causato un eccessivo sfruttamento della risorsa idrica per usi sia privati che agricolo-industriali. Il cospicuo abbassamento del livello piezometrico della falda (in media circa 20

m in 30 anni) determina l'essoluzione dell'anidride carbonica disciolta nella falda, con il conseguente incremento di tale gas nell'aria.

Un possibile ulteriore rischio presente nell'area riguarda la possibilità che esista un apporto di fluidi endogeni ricchi in CO_2 sotto i laghi craterici di Albano e Nemi che provochino la tracimazione delle acque e inneschino fenomeni di colate di fango ed assoluzione di grandi quantità di CO_2 (si ricordano i casi illustrati in dei laghi di Nyos e Monoum, Capitolo 2.2 pag 11).

Testimonianza di eventi catastrofici sono i *lahar* avvenuti in epoca preistorica e storica (l'ultimo datato al 398 a. C.) (De Benedetti *et alii* 2008). Essi sono associati alla tracimazione dell'acqua dal bordo settentrionale del *maar* di Albano e costituiscono la formazione del Tavolato. Numerosi miti e ritrovamenti archeologici comprovano l'attività freatica del *maar* e ne è riprova l'intervento effettuato dai Romani nel 394 a. C. I Romani scavarono a quota di sicurezza di 70 m al di sotto del bordo craterico, un tunnel di 1.5 km che avrebbe dovuto drenare l'acqua qualora il livello del lago fosse pericolosamente cresciuto. Questo tunnel ancora visibile, può essere considerato la prima opera di prevenzione dall'attività vulcanica in seguito ad eventi catastrofici.

La presenza di depositi di *lahar* attribuiti all'attività vulcanica olocenica recente comportano una riconsiderazione della pericolosità vulcanica nell'area dei Colli Albani e sull'*hinterland* di Roma. Il vulcano dei Colli Albani è quindi da considerarsi quiescente. Il moderato rischio di riattivazione dell'apparato dei Colli Albani è monitorato dall'INGV attraverso il controllo della rete sismica.

2.4 PERICOLOSITÀ GEOLOGICA ED ISTITUZIONI

In seguito agli eventi calamitosi del 1976 in Friuli e del 1980 in Irpinia le istituzioni governative si convincono della necessità di un organo istituzionale che presieda alle attività di protezione civile con ampia competenza in materia e non solo limitata al soccorso. Nel 1992 con la legge n 225 per la prima volta le competenze in materia di protezione civile, vengono attribuite alle varie componenti del sistema Stato (Regioni, Province e Comuni). La Protezione Civile è direttamente dipendente della Presidenza del Consiglio dei Ministri, e le sono attribuite competenze non solo nella gestione delle emergenze, ma nell'ambito della previsione, prevenzione, ripristino ed informazione alla popolazione..

L'Ufficio Extradipartimentale della Protezione Civile (EPC) di Roma sta promuovendo studi metodologici mirati all'individuazione dei fattori di pericolosità della città di Roma, delle soglie di criticità del pericolo, di procedure per la valutazione e la gestione di tutti i dati territoriali utili ai fini di salvaguardia e tutela della popolazione, degli edifici, delle strutture sensibili, delle infrastrutture e dei beni culturali.

Riguardo all'individuazione di procedure operative per la valutazione delle principali pericolosità geologiche insistenti attualmente sul territorio della città di Roma, l'Ufficio Extradipartimentale di Protezione civile di Roma ha finanziato un progetto pilota su un'area che si estende dall'isola tiberina (centro storico) fino ai quartieri a sud della città, Ostiense-Magliana (Campolunghi *et alii*. 2008). Le principali sorgenti di pericolo per il tessuto urbano considerate nel progetto sono state i crolli originati dalla presenza di cavità ipogee, la subsidenza indotta da terreni ancora in fase di consolidazione, la propensione del territorio a subire dissesti a causa di sollecitazioni sismiche e la presenza di aree geomorfologiche che possano mostrare propensione ai dissesti gravitativi superficiali (in modo particolare sui terreni di origine antropica).

È inoltre stato approvato il "Piano Generale di emergenza di Protezione Civile – Scenari di rischio predefiniti e Procedure per l'attivazione e l'intervento dell'ufficio Extradipartimentale della Protezione Civile di Roma e delle Strutture Operative Comunali e di Supporto", delibera n 19 del 2008, che definisce le modalità e le procedure per l'attivazione e l'intervento in emergenza sia dell'Ufficio EPC che delle Strutture Operative Comunali e di Supporto in relazione a scenari predefiniti di rischio cui è soggetto il territorio. Nel piano generale di emergenza sono stati individuati diversi scenari di rischio predefinito ed in particolare in ambito geologico sono:

- Evento sismico,
- Evento vulcanico e correlati (emissione gas vulcanici),
- Evento meteo, idrogeologico o idraulico – Evento Tevere/Aniene,
- Cavità e crolli

L'obiettivo del Piano è assicurare rapidamente e con tempi certi la risposta operativa necessaria a risolvere i problemi legati all'emergenza. Si propone soprattutto di definire lo spazio fisico interessato dall'evento, i potenziali effetti dello stesso e la sua interazione con la popolazione e le strutture esposte, individuando delle soglie di innesco del pericolo e di attivazione delle operazioni.

In questo contesto operativo diventa un punto cruciale la gestione integrata dei dati utili alla valutazione della pericolosità. Si pone come necessaria l'informazione territoriale mirata alla corretta individuazione spaziale delle aree suscettibili dell'evento considerato nello scenario predefinito.

3. METODOLOGIA

Dopo una revisione bibliografica preliminare sulla valutazione della pericolosità geologica in varie città del mondo illustrata nel Capitolo 2, si è visto come la molteplicità delle pericolosità geologiche sia affrontata con approcci metodologici diversi. Negli ultimi decenni la complessità dei fenomeni è stata trattata attraverso i sistemi informativi in genere e quelli geografici in particolare. Le potenzialità delle banche dati geografiche si sposano con la necessità di gestire informazioni territoriali numerose ed appartenenti a diversi settori disciplinari per integrarle ed ottenere delle mappe di pericolosità o rischio. Gli strumenti informativi geografici permettono l'aggiornamento dei dati, effettuano analisi statistiche e geostatistiche, ma soprattutto sono versatili e consentono di gestire il dato dalla raccolta, alla manipolazione ed elaborazione, interrogandolo per posizione geografica o relazione topologica, oppure per attributi tematici qualitativi o quantitativi. Le potenzialità intrinseche dei sistemi informativi geografici dipendono dalla progettazione che sta a monte. Al momento della progettazione si prendono le decisioni che segneranno la destinazione d'uso e l'utilità a lungo termine del sistema informativo. In questa fase si studia esattamente cosa rappresenterà la banca dati e a quali interrogazioni dovrà poter rispondere.

In questa tesi si è voluto progettare un sistema informativo di dati territoriali che permettano di attuare procedure specifiche per le principali pericolosità geologiche incidenti in aree urbanizzate (Paragrafi 2.2, 2.3). Numerosi sono i lavori su banche dati territoriali mirate alla ricostruzione geologico stratigrafica del sottosuolo (Adams & Wiegand 1994, Laxton & Becken 1996, Nathanail & Rosenbaum 1998, Howland 2001, Apel 2006,), alcuni specifici per la definizione di un modello geologico che rappresenti adeguatamente i fattori di pericolosità specifici per una di esse (Corazza 2004, Nath 2005, Koukis et *alii* 2005, Alberico *et alii* 2005), ma non esiste una banca dati che affronti la gestione organica dei dati di base per la valutazione delle pericolosità in ambiente urbano. Nella pianificazione urbana i dati geologici e geotecnici diventano sempre più importanti per l'individuazione, il controllo e la prevenzione delle pericolosità geologiche (Bell *et alii* 1987, Legget 1987, Hake 1987, Dai *et alii* 1994, 2001, Van Rooy & Stiff 2001). Anche nel Piano Generale di emergenza appena approvato, la Protezione Civile individua prima ancora delle procedure di valutazione, i dati di base che permettono di ottenere le informazioni necessarie ad individuare la pericolosità e descrivere a scale diverse l'ambito

territoriale in cui avvengono. La realtà urbana è costituita da un complesso intreccio di livelli di informazione, ognuno dei quali interagisce con l'altro. Da qui la necessità di uno strumento di valutazione che sia multidisciplinare e capace di integrare i diversi aspetti coinvolti.

Questa tesi si occupa di tale problematica ossia dell'ottimizzazione del processo di integrazione delle informazioni di base necessarie alla costruzione di scenari di rischio realistici.

Dal punto di vista metodologico, si è cercato un approccio semiquantitativo che fosse indipendente dallo specifico processo di valutazione che si vuole adottare, ma si è focalizzata l'attenzione sulla risorsa dei dati.

Nel contesto della valutazione della pericolosità geologica in ambito urbano, a partire da dati territoriali integrati, si inserisce quindi la progettazione, portata avanti in questa tesi di dottorato, di una banca dati spaziale, progettata in ambiente G.I.S. delle informazioni geologico, geotecniche, idrogeologiche e topografiche che sono utili ed indispensabili nell'ambito della valutazione di diverse pericolosità geologiche urbane (pericolo cavità antropiche quali per esempio cave in sotterraneo e cunicoli, subsidenza legata a fenomeni di cedimento e compressibilità dei terreni, pericolosità idrogeologica in senso lato, pericolosità relativa agli effetti di sito durante il verificarsi di sismi). Dopo l'analisi spaziale dei dati si è passati a livelli successi di astrazione identificando le aree tematiche di interesse e le possibili interrogazioni che sono di massima necessarie per uno studio di pericolosità. La modellizzazione ha seguito tre fasi:

1. fase di realizzazione del modello concettuale dei dati, considerando quali fossero le informazioni determinanti ed elementari che servono allo studio della pericolosità all'interno dei principali tematismi individuati ed alle interrogazioni previste e prevedibili;
2. fase di modellizzazione logica e scelta del software;
3. fase di modellizzazione fisica, implementazione ed acquisizione dati.

I dati sono stati acquisiti per la città di Roma ed individuati in funzione delle aree tematiche e si sono raccolti o prodotti i seguenti :

1. TEMATISMO SOTTOSUOLO - dati di sondaggio: stratigrafie, geotecnica in situ, geotecnica in laboratorio e geotecnica sismica, misure piezometriche;
2. TEMATISMO GEOLOGIA – dati geologici cartografici di superficie;

3. TEMATISMO TOPOGRAFIA - dati topografici recenti e storici: dalle prime cartografie storiche scientifiche a quelle attuali;
4. TEMATISMO GEOMORFOLOGIA – dati geomorfologico da rilevamento di campagna, cartografia tematica, interpretazione di foto aeree;
5. TEMATISMO IDROGEOLOGIA – dati di indagini idrogeologiche ed idrogeochimiche: rilevamenti e cartografia tematica;
6. TEMATISMO CAVITÀ - dati sulle cavità antropiche: cartografia tematica e rilevamenti tecnici diretti dei dissesti
7. TEMATISMO ARCHEOLOGIA – dati cartografici tematici;
8. TEMATISMO SISTEMA STRADALE – dati cartografici tematici;
9. TEMATISMO EDIFICATO - dati cartografici tematici.

Per la geologia si è fatto riferimento al lavoro di Funiciello & Giordano(2008), la nuova cartografia geologica di Roma, scala 1:10000, acquisita in formato digitale vettorializzato e georeferenziato dal Laboratorio GIS del Dip.to di Scienze Geologiche dell'Università di Roma Tre.

A partire dall'integrazione dei vari tematismi, dopo una fase fondamentale di interpretazione ed analisi dei dati, si arriva alla descrizione fisica dell'ambiente investigato e della sua propensione ad ospitare eventi dannosi e pericoli geologici. In particolare dalla ricostruzione topografica e geologica e caratterizzazione geotecnica dei depositi che costituiscono il sottosuolo urbano viene ricostruito il volume di terreno significativo al fine di uno studio di pericolosità.

Infine la metodologia è stata validata studiando i casi di Porta Metronia e di via Giustiniano Imperatore, lungo due fossi in riva sinistra del Tevere. Si è approfondito l'aspetto di caratterizzazione geotecnica sismica dei terreni. Le metodologie specifiche saranno trattate nella PARTE SECONDA della Tesi di Dottorato.

3.1 LE BANCHE DATI TERRITORIALI E I SISTEMI INFORMATIVI GEOGRAFICI

Le banche dati territoriali e nello specifico i Sistemi Informativi Geografici (G.I.S. acronimo del corrispondente inglese *Geographic Information System*)) costituiscono da diversi anni la principale innovazione metodologica nell'affrontare le problematiche che insistono sul territorio. Il GIS può essere considerata una nuova disciplina dai molteplici strumenti operativi, che permettono, tra l'altro di raccogliere organicamente e gestire grandi quantità di dati, rappresentare ed analizzare scenari complessi e mutevoli ed , infine produrre simulazione di eventi. Oggi l'informazione è creata, gestita e diffusa da mezzi tecnologici tali che, per loro natura, richiedono una preventiva fase di analisi, strutturazione e correlazione logica dei dati che la caratterizzano. Tali mezzi fanno parte delle cosiddette Tecnologie dell'Informazione (IT), ossia tutti gli apparati che ci consentono di acquisire, archiviare, generare, elaborare e distribuire informazioni, indispensabili oramai per supportare le funzioni di gestione delle organizzazioni in tutti i settori.

In sostanza i Sistemi Informativi Geografici sono "un modello spaziale di archiviazione ed elaborazione di dati, eventi ed attività spaziali, finalizzato all'interpretazione del paesaggio, dal sito al territorio, dal costruito all'insediato, dalla microscala alla macroscala; nel sistema tutto è maggiore della somma delle parti, cioè il valore informativo delle interazioni fra le varie parti è superiore al contributo di ciascuna di esse" (Forte 2002). In modo più semplice si può intere il GIS come una metodologia digitale integrata per l'archiviazione, l'analisi, l'organizzazione e la comunicazione di dati spaziali georefenziati; in pratica tutto ciò che può essere integrabile con una base cartografica o topologicamente riferita: città, strade, fiumi, monumenti, sondaggi, ogni elemento spazialmente identificabile e codificabile può essere inserito e rappresentato in un GIS.

Il prodotto di visualizzazione di un GIS è una rappresentazione a più livelli di tematismi (Fig. 23), una sovrapposizione di molteplici informazioni nello stesso sistema spaziale. Gli strati informativi sono tra loro trasparenti e possono contenere qualsiasi tipo di informazione spaziale e tematica: foto aeree, dati geofisici, geologici, da satellite, cartografici, altimetrici e qualsiasi tipo di informazione rappresentabile in coordinate spaziali.

Una peculiare caratteristica è la semplice modificabilità dei vari strati informativi che permette un veloce aggiornamento dei dati adeguandoli alla realtà del territorio, ottenendo

così una rappresentazione dell'evoluzione della superficie terrestre e di alcune tipologie di fenomeni naturali (quasi) in tempo reale;

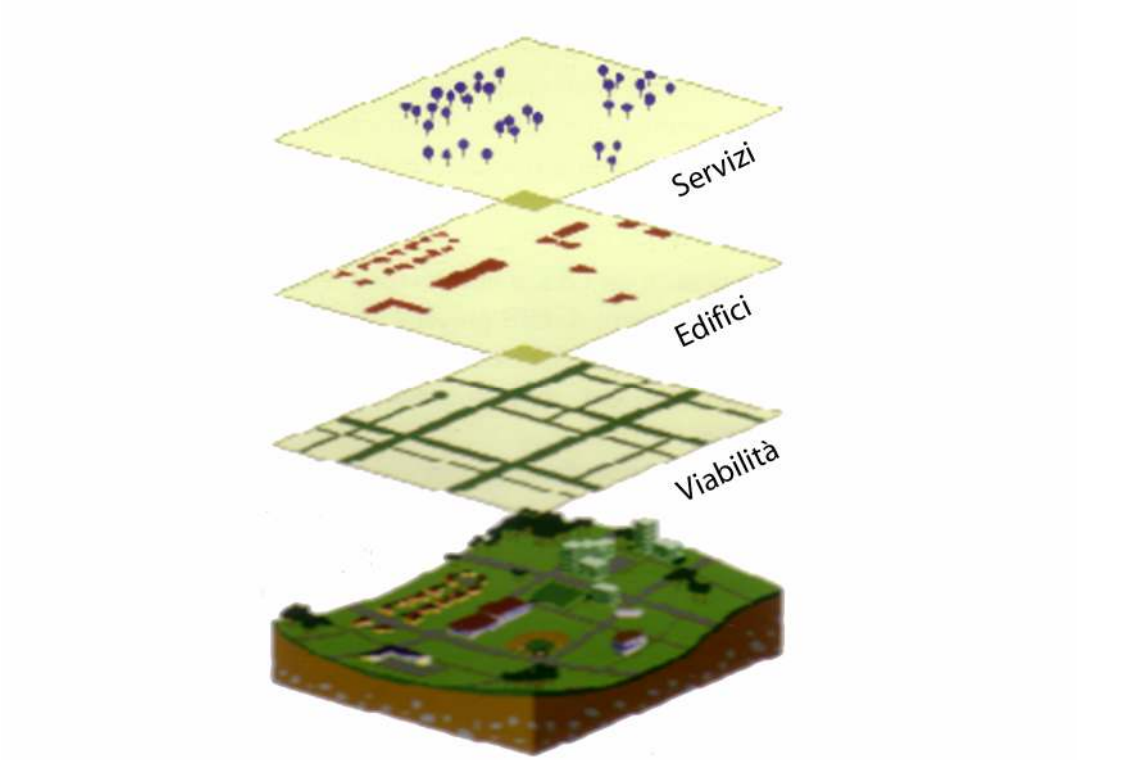


Figura 23: Esempio della rappresentazione dei livelli informativi, o tematismi (Viabilità, Edifici Servizi) che costituiscono un GIS nello spazio territoriale.

Le prime formalizzazioni di una metodologia di tipo GIS, si ebbe alla fine degli anni '60, in particolare nel 1969, quando un architetto di nome Ian McHarg pubblicò il libro "Design with Nature" nel proponeva una metodologia di analisi basata sulla comparazione di dati e sulla produzione di cartografia di sintesi. McHarg ipotizzava l'uso della sovrapposizione e quindi, integrazione di dati geografici strutturati in livelli informativi a singolo tematismo, al fine di realizzare carte di sintesi ottenute per combinazione logica, utili sia ai fini della pianificazione delle risorse naturali, sia per la gestione dei processi decisionali. Vari ricercatori cominciarono ad analizzare la possibilità di utilizzare gli elaboratori elettronici per le analisi geografiche. Le prime sperimentazioni ed applicazioni si svilupparono in Nord America (Canada e Stati Uniti) ed il progredire della ricerca tecnologica e scientifica in campo informatico ha reso fruibile tale metodologia con vantaggi costo beneficio tali che oggi è uno strumento diffuso ed ampiamente sviluppato in diverse parti del mondo. Sebbene oggi i costi per la progettazione di una infrastruttura in ambiente GIS siano fortemente diminuiti, soprattutto dal punto di vista tecnologico, le spese per i *software*, i dati e il loro mantenimento, le risorse umane, fanno sì che solo l'amministrazione pubblica

e grandi organizzazioni ed enti siano in grado di finanziarli. Attualmente le potenzialità dei Sistemi Informativi Geografici si stanno concentrando sulla rete, in particolare con applicativi *WebGis* che permettono la navigazione interattiva degli utenti e l'interrogazione di predefiniti livelli informativi, nonché si sta ponendo attenzione crescente allo sviluppo di *software* GIS *OpenSource*. I GIS sono, infatti, un insieme eterogeneo di diverse componenti e nel paragrafo seguente se ne illustrano le caratteristiche principali, le componenti ed i possibili campi di applicazione.

3.1.1 Caratteristiche, componenti ed applicazioni

I Sistemi Informativi sono nati dall'esigenza di poter disporre di potenti strumenti di raccolta ed elaborazione delle informazioni, ed in particolare, dalla necessità di fornire un supporto più efficace ed efficiente durante i delicati processi decisionali (in inglese *decision making*). In Figura 24 sono sintetizzate le diverse componenti che contribuiscono a definire un processo decisionale. Alla base di qualsivoglia decisione razionale e ponderata vi è la necessità di poter consultare in tempi ragionevolmente brevi un insieme di informazioni organizzate.

Figura 24: Schema di un processo decisionale (da Gistor '06, IGM Firenze 2006)

In generale un Sistema Informativo può essere definito come l'insieme delle apparecchiature, del software, delle applicazioni e delle persone necessarie per acquisire, organizzare, elaborare e restituire i dati relativi ad una organizzazione per consentire una gestione ottimizzata di un fenomeno del mondo reale di specifico interesse. Nel dettaglio un Sistema Informativo Geografico, consente una gestione sinottica di entità od eventi riferiti ad un determinato territorio. Rispetto a tutte le altre tipologie di sistemi informativi, i GIS si distinguono per la capacità di integrare i dati georiferiti attraverso specifici strumenti di analisi. Non si tratta di sistemi di cartografia automatizzata, né di un insieme di procedure informatiche che elaborano dati cartografici; essi sono invece strumenti indispensabili per mettere in relazioni banche dati distribuite in diverse strutture quali aziende, uffici pubblici, ecc, determinando attraverso questa integrazione il valore aggiunto dato dalla fruizione simultanea in tempo reale degli strati informativi disponibili in diverse banche dati territoriali. I Sistemi Informativi Territoriali servono principalmente per:

- rappresentare la struttura naturale o antropica;
- conoscere la distribuzione degli eventi naturali ed indotti dall'uomo;
- gestire il governo del territorio (*e-governement*);
- pianificare le risorse per gli interventi (sicurezza, protezione civile, ecc.).

Un GIS può essere significativamente considerato un sistema finalizzato alla gestione di informazioni del territorio avente come principali componenti:

1. l'*hardware*: ossia l'insieme di tutte le apparecchiature elettroniche necessarie a raggiungere l'obiettivo prefissato. Oltre all'unità di elaborazione propriamente detta, rientrano nelle attrezzature tutte le periferiche più o meno dedicate al trattamento dei dati geografici, come i monitor grafici ad alta risoluzione, plotter o stampanti grafiche, scanner, server, ecc.

2. il *software:* è il programma che permette di gestire le informazioni a carattere geografico. Tali programmi permettono la gestione di una vasta tipologia di formati di dati: dai dati vettoriali e *raster*, a modelli numerici del terreno, tabelle, ecc. Permette inoltre di analizzare, elaborare e visualizzare i dati, creando una nuova informazione.

3. i dati geografici ed alfanumerici: essi costituiscono la componente fondamentale ed imprescindibile di un Sistema Informativo Geografico, in quanto sono alla base delle elaborazioni e delle trasformazioni effettuate all'interno del sistema di cui rappresentano un elemento critico. Infatti dalla qualità del dato iniziale dipendono

le possibilità di analisi e l'affidabilità delle informazioni elaborate; a volte, anche se disponibili ed in quantità sufficiente, i dati possono essere privi di elementi conoscitivi che possono impedirne una appropriata utilizzazione. Il buon esito di un lavoro dipende quindi dall'accuratezza, precisione e, non ultimo, omogeneità dei dati. I dati che possono essere trattati in ambiente GIS sono di due tipi: (a) il dato geografico nel quale le informazioni sono oggetti memorizzati nel sistema in base alle coordinate cartesiane dei punti e linee che li compongono in un sistema di coordinate georiferito; (b) il dato alfanumerico ossia l'informazione descritta mediante caratteri e/o numeri associata ai dati spaziali, geometrici caratterizzati da un riferimento geografico. In sostanza (a) rappresenta la geometria dell'oggetto nello spazio georiferito, laddove (b) ne contiene la descrizione di che cosa essi rappresentino nella realtà.

4. la <u>componente umana</u>: intesa sia come gestori e addetti alla acquisizione prima, e manutenzione poi, del sistema e dei dati, sia come utenti finali del lavoro, studiosi ed utilizzatori. Tale componente ha determinato l'esigenza di formare personale specializzato e con professionalità diversificate, ma complementari nello sviluppo di un progetto in ambiente GIS.

Per quanto riguarda le possibili applicazioni dei GIS, i settori di maggiore impatto sono:

- geografia e demografia,
- cartografia,
- telerilevamento,
- pianificazione e gestione del territorio,
- geodesia,
- statistica,
- studi epidiemologici,
- ingegneria civile,
- risorse naturali,
- scienze naturali,
- gestione di reti infrastutturali,
- urbanistica,
- geomarketing,
- protezione civile e previsione rischi e gestione emergenze,
- ecc.

Gli ambiti di applicazione sono molteplici e si riscontrano benefici in termini di ottimizzazione dei tempi e della qualità del lavoro. I GIS stanno inoltre entrando sempre più nell'uso quotidiano e utenti non esperti della materia possono con facilità consultare e ottenere informazioni da progetti GIS, come dimostra la diffusione dei moderni sistemi di navigazione satellitare installati sulle auto e disponibili anche su modelli di telefonia mobile.

3.1.2 La struttura dati nei Sistemi Informativi Geografici

I Sistemi Informativi Geografici hanno la peculiarità di operare su dati geografici e tematici attraverso funzioni di analisi spaziale al fine di dare risposte sul mondo reale. I dati contenuti in questi Sistemi sono in definitiva dei modelli che evidenziano determinati aspetti della realtà. In base alle finalità e degli obiettivi da perseguire, il modello deve rappresentare le entità presenti nel mondo reale e le relazioni che intercorrono tra esse.
E' importante sottolineare che i modelli sono progettati per rappresentare una determinata porzione della realtà: quelle utili ai fini delle nostre analisi; modelli molto complessi sono difficili da gestire e realizzare, nonché molto costosi da aggiornare e mantenere. Il modello di dati è quindi un insieme di costrutti che descrivono e rappresentano particolari aspetti del mondo reale su un computer, e lo si può considerare una astrazione della realtà (Fig. 25).

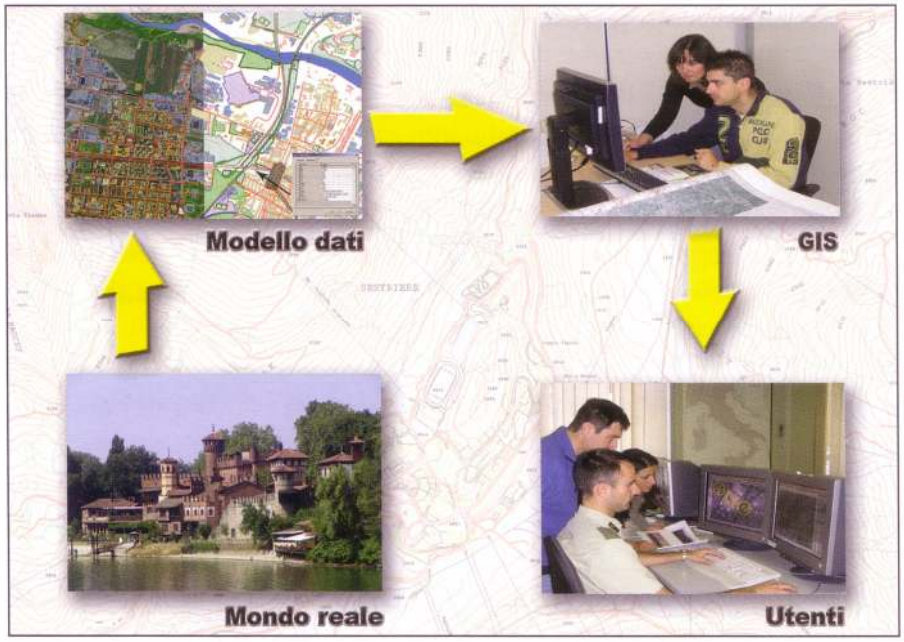


Figura 25: Esempio di modello dati, rappresentazione della realtà (da Gistor '06, IGM Firenze 2006)

La struttura dei dati può dipendere da diversi fattori quali la modalità di acquisizione delle informazioni, dalla capacità del *software* di trattarla e di sfruttarne a pieno le potenzialità, ed infine dal tipo di risultati che si vogliono ottenere. L'informazione geografica trova due principali forme di organizzazione, strutturazione e rappresentazione (Fig. 26): la struttura vettoriale e quella *raster*.

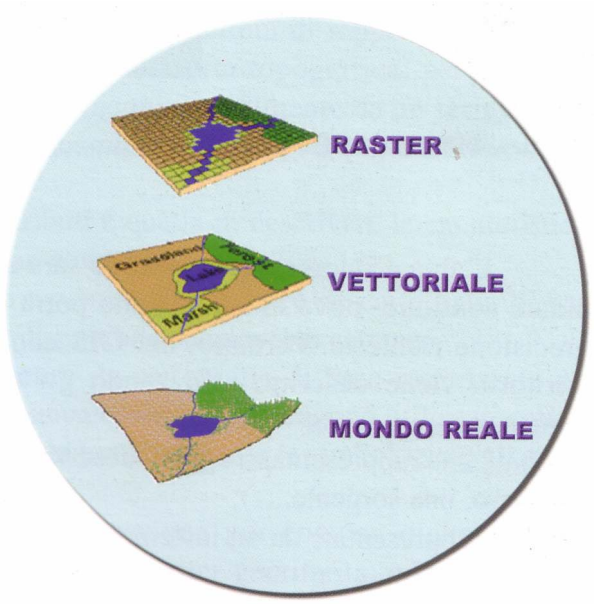


Figura 26: Esempio di dati *raster* e vettoriali che rappresentano la medesima porzione del mondo reale (da Gistor '06, IGM Firenze 2006)

La struttura vettoriale riproduce elementi della realtà in modo semplificato, basandosi su concetti prossimi al disegno geometrico. In questo modo gli elementi sono rappresentabili attraverso le primitive geometriche: punto, linea e poligono. La scelta di rappresentazione geometrica dipenderà dall'esigenza di descrivere gli oggetti attraverso coppie di coordinate (punti: per esempio sorgenti, alberi, città,..), o tramite un insieme di punti connessi (linee: per esempio strade, fiumi, limiti,..), od ancora attraverso aree racchiuse da una spezzata in cui il primo e ultimo punto coincidono (poligono: per esempio edifici, particelle catastali, aree coltivate,..). Nei sistemi progettati in ambiente GIS al dato geometrico è associato il dato alfanumerico; tale dato costituisce l'informazione che non contiene in sé le coordinate spaziali, ma è associata ad essa attraverso campi identificativi. Essa è organizzata in una o più tabelle all'interno di un *database*. Un dato alfanumerico descrittivo di un determinato elemento spaziale è comunemente detto attributo. Gli attributi dello stesso tipo costituiscono una colonna di una tabella e permettono di immagazzinare informazioni utili ai fine di una classificazione ed all'attribuzione di una simbologia, oltre ad essere necessari per analisi statistiche od interrogazioni specifiche. Attraverso specifiche funzioni di editing i dati vettoriali possono essere acquisiti attraverso una digitalizzazione manuale od

automatizzata. Sebbene molto precisa ed accurata, tale struttura del dato ha dei costi elevati di creazione ed aggiornamento, implicando una difficoltà anche nell'acquisizione in tempo reale di tali informazioni.

La struttura *raster* è considerata, invece, la più semplice ed intuitiva tra le forme di organizzazione dei dati geometrici ed è largamente usata nei GIS. Una carta *raster* è una matrice di valori numerici la cui dimensione (numero di righe per numero di colonne) dipende sia dalle dimensioni del foglio che dalla risoluzione della scansione. Questa carta può essere assimilata ad una griglia, costituita da *"n"* cellette elementari, denominate *pixel*, organizzate in *x* righe ed *y* colonne, ciascuna delle quali contiene un valore numerico che esprime una determinata tonalità di colore compreso tra 1 e 255, o un valore binario 0-1, associato ad uno specifico attributo rispetto al quale il pixel è vero o falso, o altro in funzione della tipologia d'acquisizione. Tale formato può avere differenti utilizzi: di cui il più immediato è come immagine iconografica di riferimento, non utilizzabile ai fini di una analisi modellistica, ma unicamente sfondo di dati vettoriali.

La scelta del formato è sempre subordinata alla disponibilità dell'informazione e dell'acquisizione, ma soprattutto alla finalità del dato all'interno del progetto GIS sviluppato.

4. IL MODELLO DELLA REALTÀ

In ambiente urbano gli studi geologici si basano prevalentemente sull'analisi di dati provenienti da sondaggi e la ricostruzione delle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche del sottosuolo costituisce uno dei principali obiettivi di questi studi. Nell'ottica di gestire e correlare la mole di informazioni geognostiche disponibili in ambiente urbano, sono ormai diversi decenni che i principali enti pubblici ed università finanziano progetti dove la definizione di banche dati di informazioni del sottosuolo riveste un ruolo fondamentale.
Per la città di Roma i primi lavori svolti in ambito universitario (Università La Sapienza) su banche dati mirate all'acquisizione di informazioni relative al sottosuolo risalgono al 1985 (Arecco 1985, D'Incecco 1985). Inizialmente l'utilizzo di tali banche dati era finalizzato principalmente alla cartografia geologica e strutturale (Funiciello *et alii* 1987) ed esse venivano realizzate ed implementate in modo indipendente da diversi soggetti pubblici. Successivamente negli anni '90 con il Progetto Roma si iniziò a promuovere la collaborazione tra i diversi enti ed si individuò nel Servizio Geologico d'Italia, attuale ISPRA, il punto di riferimento istituzionale per costituire una banca dati di sottosuolo completa, con il compito di uniformare ed integrare gli archivi preesistenti (Amanti *et alii* 1995). In questo modo veniva garantita la consistenza ed integrità dei dati inseriti, evitando soprattutto la duplicazione eventuale di dati.

Nell'ambito dello studio e della valutazione delle pericolosità geologiche è necessario in primo luogo procedere alla caratterizzazione geologico-stratigrafica e fisico-meccanica del sottosuolo, almeno per i primi 30 metri di profondità. Si è partiti quindi dalla necessità di conoscere e rappresentare il volume significativo di terreno per costruire uno strumento in grado di contenere informazioni multidisciplinari sul sottosuolo in particolare dati inerenti i caratteri geologico-stratigrafici e geotecnici, nonché in grado di favorire l'integrazione, l'aggiornamento e la manipolazione dei dati. Per rispondere a queste esigenze si è progettato un sistema informativo geografico *ad hoc*. Si è deciso di raccogliere le informazioni di base in una banca dati tale da poterle gestire in modo organico e consistente, dove le entità individuate fossero descritte non solo da attributi alfanumerici e numerici, ma anche da attributi geometrici e fossero definiti i rapporti topologici. Il GIS (acronimo di *Geographic Information System*) è l'ambiente di sviluppo naturale per la realizzazione di strutture di dati spaziali e presenta il vantaggio di essere espandibile ed integrabile in momenti successivi, una volta definito il nucleo di base.

Il processo di modellizzazione consta di tre fasi fondamentali (Fig. 27) a cui si giunge dopo una attenta analisi spaziale dei dati e che permettono alla fine di comprendere adeguatamente e completamente la struttura originale della banca dati:

1. progettazione concettuale: modello concettuale
2. progettazione logica: modello logico
3. progettazione fisica: modello fisico dei dati.

Tali fasi sono trattate ed approfondite nei sottocapitoli seguenti.

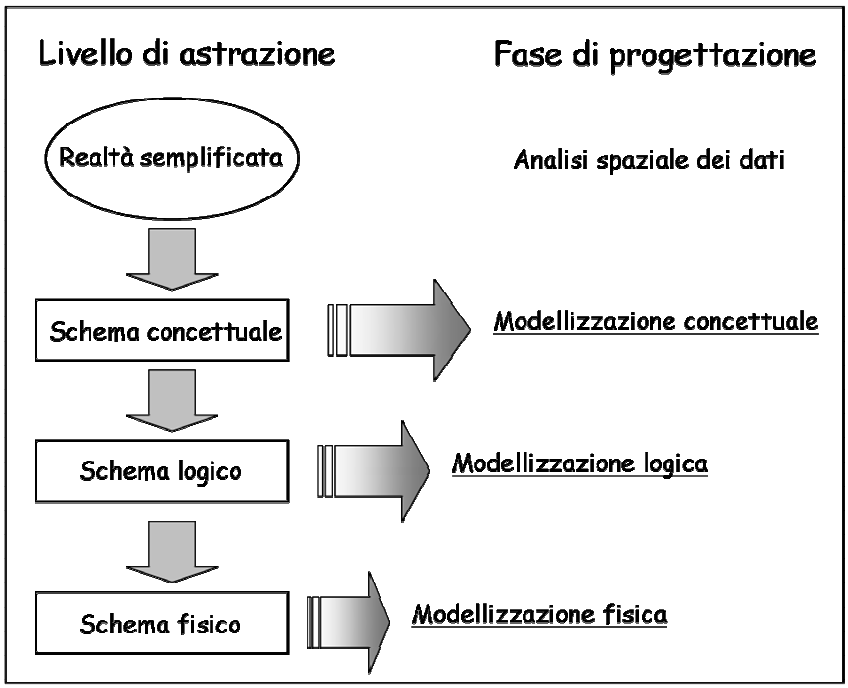


Fig. 27: Schematizzazione delle fasi in cui si sviluppa la progettazione di un sistema informativo territoriale, dall'analisi della realtà che si vuole rappresentare fino alla sua ideazione, creazione ed implementazione, analogamente al processo che porta alla costruzione di una base di dati non spaziali.

4.1 IL MODELLO CONCETTUALE

Nella fase di modellizzazione concettuale la realtà indagata durante la fase di analisi spaziale dei dati viene semplificata attraverso un processo di astrazione. La complessità dei fenomeni viene ricondotta a pochi elementi considerati fondamentali ai fini della rappresentazione. Lo scopo della progettazione concettuale è quello di rappresentare le specifiche informali della realtà di interesse in termini di una descrizione formale e completa, ma indipendente dai criteri di rappresentazione utilizzati nei sistemi di gestione di base di dati. Il modello concettuale consente di descrivere l'organizzazione dei dati ad un alto livello di astrazione, senza tenere conto degli aspetti implementativi. In questa fase si rappresenta il contenuto informativo della base dei dati, senza preoccuparsi né delle

modalità con le quali queste informazioni verranno codificate in un sistema reale, né dell'efficienza dei programmi che faranno uso di queste informazioni. Si individuano quindi tutte le entità che si vogliono gestire, interrogare, manipolare nella banca dati e rappresentano le informazioni utili, nel nostro caso, ai fini della ricostruzione stratigrafica e geotecnica del sottosuolo in base a delle aree tematiche scelte in funzione della valutazione delle pericolosità geologiche connesse a:

1. fenomeni di dissesto idrogeologico, con particolare attenzione ai terreni di riporto,
2. pericolo di crollo per presenza di cavità antropiche,
3. pericolo di subsidenza geotecnica,
4. pericolosità geotecnica sismica

Le aree tematiche ritenute fondamentali per la valutazione di suddette pericolosità sono state:

a. SOTTOSUOLO,
b. GEOLOGIA,
c. TOPOGRAFIA,
d. GEOMORFOLOGIA,
e. IDROGEOLOGIA,
f. CAVITÀ

Per permettere considerazioni territoriali con riferimenti ai manufatti antropici e capirne quindi le relazioni, si sono integrate tre ulteriori tematiche, acquisite solo come cartografia:

g. ARCHEOLOGIA,
h. EDIFICATO,
i. SISTEMA STRADALE.

Le entità integrate appartengono ai tematismi e derivano da riflessioni sulla necessità di avere dati topografici, idrogrogeologici ed idrografici, geochimici, relativi alle cavità, ai dissesti, alla geologia di superfici in una rappresentazione reale tale da per poter affrontare la pericolosità geologica in senso più ampio. E' evidente che le entità che si

possono coinvolgere sono molteplici e relative alle più diverse competenze, essendo lo studio di pericolosità sostanzialmente multidisciplinare e molto variegato. Essendo l'approccio della tesi di tipo metodologico e sperimentale, non si è potuto né voluto estendere troppo il nucleo di base del sistema informativo, sia per mancanza di competenze sia per il pericolo di perdersi nella ricerca di infinite entità. Per queste ragioni il *database* risulta in parte sbilanciato sulla parte di modellazione geologica del sottosuolo tramite dati di sondaggio e dati di superficie.

Nella progettazione di questa banca dati si è deciso di non crea relazioni statiche tra i vari tematismi in quanto appesantirebbero notevolmente il lavoro di modellizzazione. I vari tematismi sono tra di loro indipendenti nella fase di gestione dei dati; ma esistono relazioni tra le entità contenute nel singolo tematismo. In particolare il tematismo sviluppato in modo più ampio e completo e quello del SOTTOSUOLO, che costituisce l'entità precipua del sistema informativo geografico sviluppato.

Il modello entità-relazioni (modello *E-R*, Chen 1976) spiega in modo immediato e grafico il modello concettuale del SOTTOSUOLO, in particolare quali sono le entità coinvolte e quali sono le relazioni tra esse (Fig. 27). Infatti la banca dati progettata è di tipo relazionale e prevede di esplicitare le relazioni che intercorrono tra le diverse entità e soprattutto di definirne la cardinalità (il numero minimo e massimo di valori associati ad ogni occorrenza dell'entità) e le chiavi primarie (identificatori) ed esterne. In questa fase si definiscono gli attributi delle diverse entità, ossia si individuano le informazioni alfanumeriche e/o numeriche, che descrivono l'entità e che sono di tipo elementare, cioè che non sono derivate da operazioni tra altri attributi già inseriti.

Le entità che si scelgono, condizionano la funzionalità e la potenzialità del sistema informativo realizzato. Tale scelta, derivata dall'analisi dei dati, dipende sostanzialmente dalle applicazioni che si intendono effettuare in virtù dell'organizzazioni dei dati. E' in questo momento che si definiscono le informazioni che sono essenziali ed è la fase più delicata ma anche quella dove si può intervenire, cambiando abbastanza agevolmente le entità, gli attributi e le relazioni, in quanto si è lontani dall'inserimento fisico dei dati. Il modello concettuale finale deriva da una serie di raffinamenti successivi a partire da uno schema iniziale che descrive tutte le specifiche con pochi concetti molto astratti. Tale strategia di progetto è definita *top-down* ed è stata seguita per produrre il modello finale.

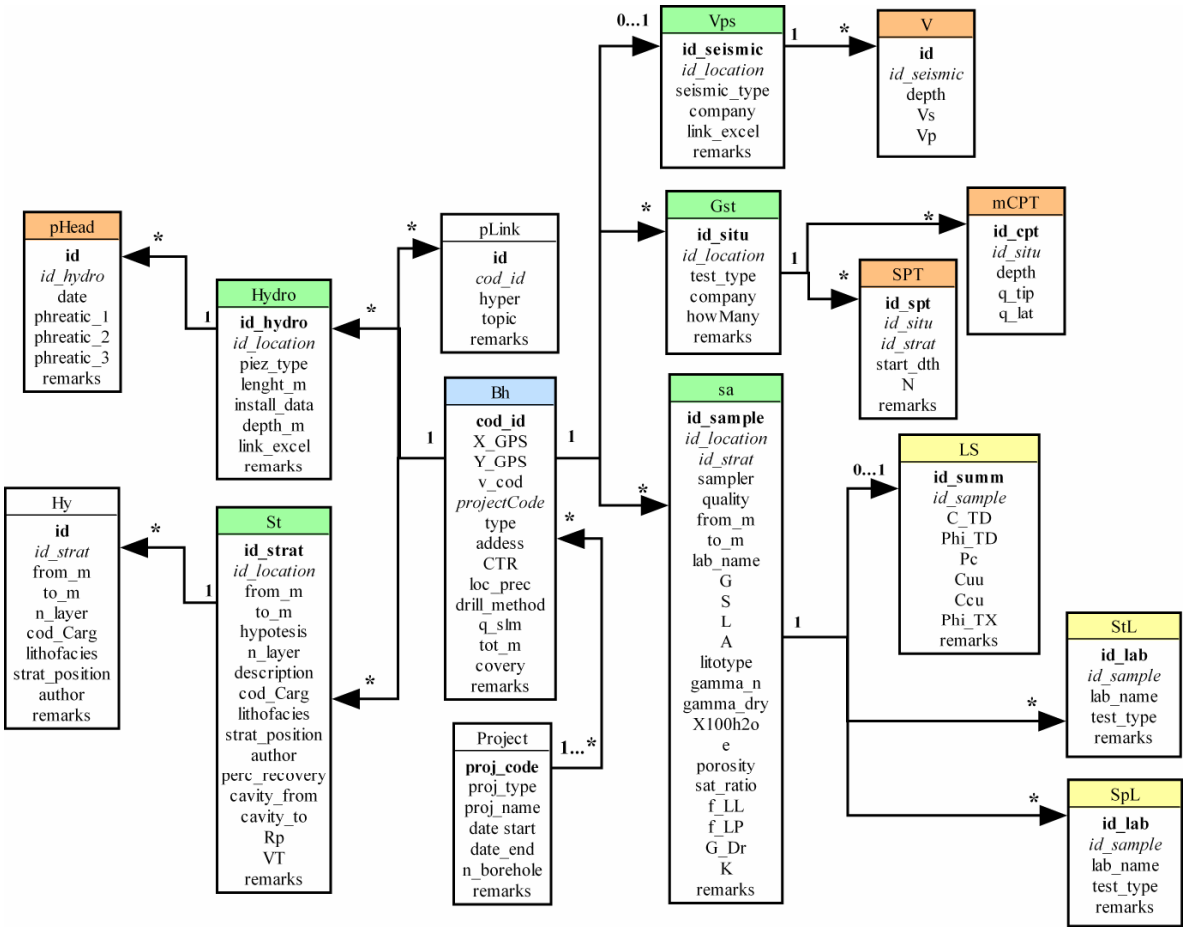


Figura 28: Diagramma Entità-Relazioni (E/R) rappresentante il modello concettuale della base di dati. Il colore azzurro indica l'entità generale Bh a cui sono associate in relazione 1 a molti o nessuno (*), le entità in colore verde; in giallo ed in arancione sono colorate le entità che si associano a Bh indirettamente, attraverso un'altra tabella e rappresentano rispettivamente le misure effettuate in sito e quelle realizzato in laboratorio. In grassetto sono evidenziati gli attributi che costituiscono la chiave primaria della tabella e in corsivo sono invece le loro chiavi esterne.Per la comprensione delle entità, attributi e relazioni si rimanda al paragrafo 3.2 sulla struttura dei dati.

4.2 LA STRUTTURA DEI DATI DEL SOTTOSUOLO

In questo paragrafo si illustra la struttura dei dati ossia la loro organizzazione, descrivendo le tabelle (rappresentanti le entità del modello) con i relativi campi (rappresentanti gli attributi) e le specifiche relazioni che intercorrono tra loro così come illustrate nel modello E/R delle informazioni del sottosuolo (Fig. 28). La relazione primaria che intercorre fra tutte le entità definite è dato dagli attributi che ne rappresentano la quota rispetto al piano campagna. Infatti a partire da questa informazione, previa conversione in quota assoluta sul livello del mare, è possibile sempre correlare tutte le diverse entità. In

Tabella 6 sono riassunte le entità e il loro significato rispetto alle informazione del sottosuolo che rappresentano.

ENTITÀ	TIPOLOGIA DELL'INFORMAZIONE RAPPRESENTATA
Bh	Caratteri generali del foro di sondaggio
Project	Informazioni sul progetto o fonte dell'informazione inserita in **Bh**
St	Informazioni stratigrafiche di cantiere ed attribuzione geologica
Hy	Possibile interpretazione stratigrafica alternativa
Gst	Informazione sulla geotecnica in situ
mCPT	Misure relative alle prove CPT in **Gts**
SPT	Misure relative alle prove SPT in **Gts**
Vps	Informazioni sulle prove sismiche in foro
V	Misure relative alle velocità delle onde S e P durante le prove in **Vps**
sa	Informazioni sui campioni prelevati
LS	Riassunto delle misure dei principali parametri determinati con le prove di laboratorio
StL	Informazioni sulle prove di laboratorio standard
SpL	Informazioni sulle prove di laboratorio per la caratterizzazione della risposta dinamica
Hydro	Informazioni sui piezometri installati in foro;
pHead	Misure piezometriche
pLink	Informazioni sulla documentazione tecnica e non, in formato digitale

Tabella 6: Schematizzazione delle entità definite per la modellizzazione del sottosuolo, associate al tipo di informazioni della realtà investigata esse rappresentano

Di seguito si analizzano dapprima le entità, prese singolarmente, con gli attributi che le caratterizzano, esplicitando le considerazioni che hanno portato alla loro scelta. Sono definite le chiavi primarie ed esterne ed la definizione del campo di variabilità dei valori, occorrenze specifiche delle entità. Successivamente si specificano le relazioni che sussistono tra le entità, in che modo bisogna interpretarne la cardinalità e perché è stata fatta tale scelta.

E' importante sottolineare come la scelta degli attributi ed ancor prima delle entità dipenda molto dallo scopo con cui è stata creata la banca dati, nel nostro caso per la gestione sistematica di dati necessari alla valutazione geologica, e dal tipo di interrogazioni che si decide di avere la possibilità di eseguire. Le interrogazioni considerate e le possibili previste durante la messa in opera della banca dati geografica, sono illustrate nel Paragrafo 4.2.3.

4.2.1 Le entità

1. Bh: è l'entità principale del modello e rappresenta le informazione relative ai sondaggi. Essa rappresenta il punto di partenza della modellizzazione del sottosuolo in quanto se non esiste il sondaggio, di qualunque natura esso sia, decade la possibilità di esistere le altre entità. L'entità **Bh** rappresenta fisicamente l'ubicazione del sondaggio e la sua posizione altimetrica, oltre ad altre caratteristiche tecniche proprie della perforazione. Gli attributi che la caratterizzano sono quindi:

cod_id:: identificativo progressivo del sondaggio e costituisce la chiave primaria nella tabella dell'entità. Viene attribuito durante l'acquisizione del dato ed è un campo alfanumerico obbligatorio che non può essere né nullo né ripetersi come valore;

X_GPS: è la longitudine espressa in metri nel sistema di riferimento nazionale italiano Roma 40-Gauss Boaga, misurata in sito tramite GPS; non è un campo obbligatorio in quanto non sempre i sondaggi sono ubicati con il GPS, ma sovente la loro ubicazione è fornita su una carta topografica di riferimento;

Y_GPS: è la latitudine espressa in metri nel sistema di riferimento nazionale italiano Roma 40-Gauss Boaga, misurata in sito tramite GPS; non è un campo obbligatorio per le stesse motivazioni della longitudine e quindi può essere non compilato;

v_cod: contiene l'identificativo originale del sondaggio prima della sua acquisizione, cioè quello attribuito da chi ha effettuato l'indagine; è utile per mantenere una relazione con il dato di partenza e poterlo rintracciare con più facilità e rapidità per eventuali controlli;

projectCode: è il codice corrispondente al progetto a cui appartiene il sondaggio; è la chiave esterna che collega la tabella **Bh** a quella **Project**, così che è sempre possibile conoscere per quale progetto o campagna di indagine è stato effettuato il sondaggio e quindi con quali finalità, nonché sapere quanti e quali sono gli altri sondaggi relativi allo stesso progetto/campagna;

type: contiene l'informazione relativa alla tipologia del sondaggio ed è stato definito un dominio di possibili tipi di sondaggio:

a. SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO
b. SONDAGGIO A DISTRUZIONE DI NUCLEO
c. SONDAGGIO ARCHEOLOGICO
d. INDAGINE GEOTECNICA IN SITU
e. POZZO PER ACQUA
f. ALTRO (SPECIFICARE)

address: indirizzo relativo all'ubicazione del sondaggio al momento dell'indagine; è un campo non obbligatorio, ma utile per verificare la congruenza dell'ubicazione fornita in termini di coordinate GPS o punto in carta;

CTR: numero della carta tecnica regionale del Lazio (scala 1:10000) in cui ricade l'ubicazione del sondaggio; è un campo obbligatorio, ricavabile in fase di informatizzazione del sondaggio;

loc_prec: corrisponde ad un indice semiquantitativo che indica il grado di precisione planimetrica nell'ubicazione del dato durante la sua informatizzazione; permette quindi di valutare l'affidabilità del dato e di selezionare i sondaggi in modo opportuno in funzione del tipo di analisi per la quale li si vuole utilizzare; i valori dell'indice sono:

0. BASSA, da informazione generica (errore planimetrico maggiore di 15 metri);
1. MEDIOCRE, da informazione non puntuale, estrapolata dall'indirizzo (errore planimetrico compreso tra i 10 e i 15 metri);
2. BUONA, da mappa georeferenziata (errore planimetrico compreso tra i 5 e i 10 metri);
3. ECCELLENTE, da coordinate GPS (errore planimetrico minore di 5 metri)

drillMethod: è relativo al metodo di perforazione utilizzato durante l'esecuzione dell'indagine; è un campo obbligatorio solo per i sondaggi a carotoggio continuo;

q_slm: è l'attributo che contiene le quote assolute (metri sul livello del mare) relative alla quota di boccapozzo misurata in cantiere o, in ogni caso attribuita all'ubicazione del sondaggio; è un campo obbligatorio in quanto l'assenza della quota rende inutilizzabili le informazioni relative al sondaggio in quanto non viene identificato il piano campagna, che fornisce una ulteriore indicazione sull'affidabilità del dato (vedi paragrafo 8.1.2.1.) ed è il riferimento per l'ubicazione altimetrica di qualsiasi informazione geologica inserita nel database (e.i quota stratigrafica, quota relativa dei campioni, ecc).

tot_m: lunghezza totale del sondaggio espressa in metri; è utile per controllare la congruenza delle informazioni stratigrafiche e sapere la profondità massima a cui si possono avere informazioni relativamente al sondaggio preso in considerazione; non è un campo obbligatorio;

covery: informazione relativa al rivestimento del sondaggio in termini di materiale utilizzato, quota dal piano campagna di rivestimento e diametro dei tubi utilizzati; il campo non è obbligatorio e il valore nullo può corrispondere sia all'assenza dell'informazione sia all'assenza del rivestimento

remarks: è un campo facoltativo dove si possono inserire notazioni od informazioni sul sondaggio che si ritengono rilevanti o commenti utili nella gestione ed utilizzo dei sondaggi.

2. Project: è l'entità che rappresenta i progetti o le campagne di indagini per le quali sono stati effettuati i sondaggi inseriti nell'entità **Bh**; tale entità permette di ricostruire il percorso di ritrovamento del dato e risalire alla finalità del sondaggio che può spaziare da finalità applicative quali costruzione di gallerie, metropolitane, edifici, ecc. ad interessi di studi accademici, od essere di natura bibliografica. Gli attributi definiti per tale entità sono:

projCode: identificativo del progetto o campagna di indagine o fonte bibliografica, costituisce la chiave primaria associata all'entità **Project**;

proj_type: si riferisce alla tipologia della campagna di indagine, del progetto o della fonte bibliografica e il dominio dei valori considerati è il seguente:

a. FASE PRELIMINARE PROGETTAZIONE METROPOLITANA
b. FASE ESECUTIVA PROGETTAZIONE METROPOLITANA
c. FONTE BIBLIOGRAFICA
d. ALTRO (SPECIFICARE)

proj_name: contiene il nome del progetto o della fonte bibliografica;

date_start: data di inizio lavori relative alla campagna o progetto considerato; nel caso della fonte bibliografica il campo è nullo ed eventuali informazioni su il periodo di esecuzione delle indagini può essere inserito nel campo *remarks*.

data_end: data di fine lavori relative alla campagna o progetto considerato; nel caso della fonte bibliografica vale quanto detto per il campo *date_start*.

n_borehole: numero di sondaggi complessivi eseguiti durante la campagna di indagine in considerazione ed è un campo non obbligatorio;

remarks: è un campo facoltativo dove si possono inserire notazioni od informazioni sul progetto o sulla fonte bibliografica che si ritengono rilevanti o commenti utili o di richiamo eventuale.

3. St: è l'entità figlia dell'entità **Bh** e rappresenta l'informazione stratigrafica connessa al sondaggio. Sostanzialmente ogni istanza che appartiene all'entità è uno strato che si incontra nel sondaggio, così come descritto nella stratigrafia di cantiere. Gli attributi che la caratterizzano sono:

id_strat: è l'identificativo dello strato (chiave primaria) e viene attribuito al momento dell'acquisizione che viene effettuata a partire dalla stratigrafia di cantiere.

id_location: è l'attributo che individua il sondaggio a cui appartiene lo strato e ne costituisce dunque la chiave esterna; tramite questo attributo è possibile dallo strato risalire al relativo sondaggio in **Bh**;

from_m: indica la quota rispetto al piano campagna del tetto dello strato descritto nella stratigrafia di cantiere espressa in metri;

to_m: indica la quota rispetto al piano campagna del letto dello strato descritto nella stratigrafia di cantiere espressa in metri;

n_layer: numero progressivo dello strato, ottenuto contando a partire dal piano campagna; è utile per risalire rapidamente alla sequenza ordinata degli strati che sono descritti nella stratigrafia di un sondaggio a partire da quello più prossimo al piano campagna.

description: contiene la descrizione originale di cantiere dello strato; contiene quindi informazioni variabili, ma sostanzialmente riconducibili a caratteri litologici (granulometria, composizione, colore, cementazione), litotecnici speditivi (umidità, grado di addensamento, plasticità, componente organica) e/o paleontologici, (fossili visibili ad occhio nudo);

hypotesis: è un campo booleano (sì/no), relativo alla possibilità che l'interpretazione relative allo strato descritto in cantiere corrisponda a più di una formazione geologica di letteratura; in caso affermativo, ne consegue la necessità di considerare l'entità **Hy**; ossia ipotizzare che più formazioni geologiche corrispondano alla descrizione dello strato, invece di una sola. Questa possibilità è correlata di solito ad una scarsa accuratezza nella descrizione di cantiere che fa descrivere come uno strato unico ciò che in realtà è differenziabile in più strati.

cod-Carg: è l'attributo associato all'interpretazione geologica dello strato; il dominio dei valori che può assumere è individuabile, per esempio, in base alla cartografia geologica alla minor scala disponibile;

lithofacies: contiene l'informazione sulla facies litologica delle formazioni sedimentarie individuate; fa riferimento alla formazione geologica, ma si basa sulla descrizione litologica di cantiere o su eventuali analisi granulometriche su eventuali campioni prelevati;

strat_position: posizione stratigrafica dello strato rispetto alla formazione a cui è stato attribuito; sovente infatti lo strato può essere solo una porzione della formazione a cui appartiene; il dominio dei valori possibili corrisponde alle diverse posizioni stratigrafiche che si possono avere:

a. TETTO (TOP): nello strato si individua solo il tetto della formazione e coincide con il tetto dello strato;
b. LETTO (BOTTOM): nello strato si individua solo il letto della formazione e coincide con il letto dello strato;
c. TETTO E LETTO (TOP & BOTTOM): nello strato si individuano sia il tetto sia il letto della formazione e coincidono rispettivamente con il tetto e il letto dello strato;
d. NEL MEZZO (MIDDLE): nello strato non si individuano né il tetto né il letto della formazione e quindi lo stato ha una posizione all'interno della formazione.

author: corrisponde alla persona che interpreta lo strato che non necessariamente coincide con quella che inserisce i dati; è una informazione utile per poter sempre avere un riferimento per la comprensione delle motivazioni dell'interpretazione data;

perc_recovery: è la percentuale di materiale carotato recuperato durante il carotaggio continuo e può assumere i valori compresi nell'intervallo tra 0 (materiale carotato non recuperato) e 100 (materiale carotato totalmente recuperato).

cavity_from: è un campo facoltativo che considera la possibilità che all'interno dello strato sia presente una cavità o un vuoto e ne rappresenta la quota di tetto rispetto al piano campagna espressa in metri;

cavity_to: è un campo facoltativo come il campo *cavity_from* e rappresenta la quota di letto del vuoto rispetto al piano campagna espressa in metri;

Rp: indica la misura della resistenza alla punta, effettuata con il penetrometro tascabile in cantiere, sullo strato; spesso è un valore mediato su più misure espresso in kg/cm^2;

VT: indica la misura in cantiere della resistenza di taglio non drenata, ottenuta sullo strato con uno scissometro portatile opportunamente tarato ed espresso in kg/cm^2;

remarks: è un campo facoltativo dove si possono inserire notazioni od informazioni sullo strato, sull'interpretazione od altro che si ritengono rilevanti.

4. Hy: è l'entità che rappresenta le interpretazione di strati contenuti in **St** a cui corrisponde più di una formazione geologica. E' una ipotesi che deriva da descrizioni litostratigrafiche molto generiche e poco approfondite, estese per spessori significativi. Di consueto le conoscenze bibliografiche (sequenza stratigrafica, spessori tipo) o la correlazione con altri sondaggi nella medesima area possono dare indicazioni sulle possibili suddivisioni dello strato restituito in cantiere come unico; è una entità la cui esistenza dipende necessariamente da **St** e ha i seguenti attributi:

id: identificativo dello strato ipotizzato come parte strato generico descritto in **St**;

id_strat: è la chiave esterna che permette di trovare in **St** lo strato a cui si riferisce lo strato interpretato in **Hy**;

from_m: indica la quota rispetto al piano campagna del tetto dello strato ipotetico all'interno dello strato della stratigrafia di cantiere espressa in metri; è una quota ipotizzata su base bibliografica e di ragionevolezza;

to_m: indica la quota rispetto al piano campagna del letto dello strato ipotetico all'interno dello strato della stratigrafia di cantiere espressa in metri; è una quota ipotizzata su base bibliografica (e.i. spessore medio atteso)e di ragionevolezza

n_layer: numero progressivo dello ipotizzato, crescente a partire dal tetto verso il letto dello strato in **St**;

cod_Carg: è l'attributo associato all'interpretazione geologica dello strato; il dominio dei valori che può assumere è necessariamente il medesimo di quelli individuati per nell'attributo *cod-Carg* dell'entità **St**;

lithofacies: come nell'attributo in **St**, contiene l'informazione sulla facies litologica delle formazioni sedimentarie individuate e fa riferimento alla formazione geologica; lo si può determinare su base bibliografica, qualora la descrizione non sia sufficiente per ipotizzarla.

strat_position: idem in **St**, ma in base a considerazioni geologiche o conoscenze bibliografiche sugli spessori della formazione attribuita;

author: il nome della persona che interpreta e che formula l'ipotesi relativa al significato geologico-stratigrafico dello strato interessato;

remarks: è un campo facoltativo che in questa entità fondamentale; contiene la descrizione e/o i riferimenti bibliografici che hanno determinato l'interpretazione dello strato inserito;

5. **Gst**: è l'entità che rappresenta le indagini geotecniche in situ più comunemente effettuate durante le campagne geognostiche; è un'entità figlia dell'entità **Bh** e permette di conoscere quante e quali indagini sono effettuate per un determinato sondaggio od ubicazione; può ma non è necessariamente correlabile all'informazione stratigrafica; gli attributi che la caratterizzano sono i seguenti:

***id_situ*:** è l'identificativo (chiave primaria) dell'indagine geotecnica o del gruppo di indagini geotecniche in situ dello stesso tipo effettuate a profondità diverse, ma nella stessa ubicazione o sondaggio; viene attribuito al momento dell'acquisizione;

id_location: è l'attributo che individua il sondaggio a cui appartengono il gruppo di indagini in situ inserito e ne costituisce dunque la chiave esterna; tramite questo attributo è possibile dalle indagini in situ risalire al relativo sondaggio in **Bh**;

test_type: definisce la tipologia della prova geotecnica eseguita nel foro di sondaggio; il dominio dei possibili valori comprende le prove geotecniche in foro che sono di più ampio utilizzo e sono:

a. SPT
b. DPSH
c. CPT/CPTE/CPTU
d. PROVA PRESSIOMETRICA
e. PROVA DILATOMETRICA
f. PROVA DI LEFRANC
g. PROVA LUGEON

company: attributo che indica il nome della ditta esecutrice dell'indagine;

howMany: numero di prove dello stesso tipo che appartengono al gruppo;

remarks: è un campo facoltativo dove si possono inserire notazioni od informazioni sul gruppo di prove geotecniche in situ od altro che si ritengono rilevanti.

6. **mCPT**: è l'entità che rappresenta le misure di CPT, prova penetrometrica statica ed è una entità figlia dell'entità **Gst**; gli attributi sono di seguito illustrati:

id_cpt: identificativo della misura della CPT, rappresentato da un contatore (chiave primaria);

id_situ: chiave esterna della tabella che permette di individuare a quale prova CPT in **Gst** si riferisce la misura e risalire poi all'ubicazione in **Bh**;

depth: profondità dal piano campagna a cui è stata effettuata la misura espresso in metri;

q_tip: valore di resistenza alla punte misurato durante la prova alla profondità indicata espresso in MPa;

q_lat: valore di resistenza laterale misurato durante la prova alla profondità indicata espresso in MPa;

7. SPT: è l'entità che rappresenta la misura ottenuta nella prova penetrometrica dinamica standard; è una entità figlia di **Gst** e permette di sapere quante prove di questo tipo sono state effettuate in un determinato sondaggio, a che profondità e in quale strato;

***id_SPT**:* identificativo della singola prova SPT effettuata (chiave primaria);

id_situ: chiave esterna che indica a quale gruppo di prove SPT è relativa la misura e quindi a quale sondaggio;

id_strat: chiave esterna che indica in quale strato dell'entità **St** è stata effettuata la prova SPT;

start_dth: profondità in metri rispetto al piano campagna del punto di inizio infissione dello strumento utilizzato nella prova;

N: numero di colpi necessario a far infiggere di 30 cm lo strumento così come indicato nelle raccomandazioni dell'AGI per le prove geotecniche in situ; fornisce una misura della resistenza del terreno alla penetrazione;

remarks: è un campo facoltativo dove si possono inserire notazioni od informazioni sull'esecuzione della prova SPT od altro che si ritiene rilevante.

8. Vps: è l'entità che rappresenta le indagini sismiche in foro ed è una entità figlia di **Bh**; per quanto riguarda le prove geofisiche che richiedono più di un foro di sondaggio, l'entità Vps si collega ad uno solo dei fori, il foro energizzatore;

***id_seismic**:* identificativo della prova sismica in foro effettuata (chiave primaria);

id_location: chiave esterna che permette di ottenere il foro di sondaggio dove è stato posizionato l'energizzatore durante la prova, nel caso di prova a più fori, altrimenti dove è stato posizionato il ricevitore del segnale;

seismic_type: è l'attributo che descrive la tipologia di prova sismica in foro effettuata e i valori possibili che può assumere sono relative alle prove sismiche più diffuse:

a. CROSS HOLE (PIÙ DI UN FORO)
b. DOWN HOLE
c. UP HOLE

company: attributo che indica il nome della ditta esecutrice dell'indagine;

link_excel: campo booleano (sì/no) che indica se è presente o meno la documentazione della prova in formato digitale .xls;

remarks: è un campo facoltativo dove si possono inserire notazioni od informazioni sull'esecuzione della prova sismica in foro od altro che si ritiene rilevante.

9. V: è l'entità che rappresenta le misure di velocità delle onde di volume (P,S) ottenute attraverso le prove sismiche individuate in Vps e misurate ad una determinata profondità dal piano campagna, definita dal passo delle misurazioni (ogni metro od ogni due metri, di solito);

id: identificativo univoco e quindi chiave primaria dell'entità **V**;

id_seismic: chiave esterna relativa all'entità **Vps**, tramite la quale si risale alla prova sismica in foro a cui la misura appartiene e perciò al sondaggio in **Bh**;

depth: profondità in metri rispetto al piano campagna alla quale sono state misurate le velocità delle onde S e P;

Vs: misura relativa ad una determinate quota delle onde di taglio S misurata in m/s;

Vp: misura relativa ad una determinate quota delle onde longitudinali P misurata in m/s;

10. **sa**: è l'entità che rappresenta i campioni, disturbati ed indisturbati che si prelevano durante il sondaggio e che vengono utilizzati per effettuare la caratterizzazione geotecnica mediante le prove di laboratorio; è un'entità figlia di **Bh**, ma presenta una relazione anche con gli strati in cui vengono prelevati, rappresentati nell'entità **St**; gli attributi definiti per questa entità sono relativi non solo alle caratteristiche tecniche di prelievo, ma anche alle analisi fisica di base dei campioni che si effettua in laboratorio.

id_sample*:* identificativo del campione (chiave primaria);

id_location: chiave esterna che permette di individuare il sondaggio a cui appartiene il campione prelevato;

id_strat: chiave esterna che permette di recuperare le informazioni relativo allo strato corrispondente al campione prelevato;

sampler: è l'attributo che specifica il tipo di campionatore utilizzato per il prelievo del campione; il dominio dei valori possibile è il seguente:

a. SHELBY DIAMETRO 101MM
b. SHELBY DIAMETRO 127MM
c. DENISON
d. MAZIER
e. OSTERBERG

quality: indica il grado di disturbo del campione e si prevedono i valori

1. DISTURBATO
2. INDISTURBATO;

lab_name: attributo che indica il nome del laboratorio che ha eseguito la caratterizzazione fisica del campione;

from_m: quota espresso in metri rispetto al piano campagna che corrisponde alla testa del campione;

to_m: quota espresso in metri rispetto al piano campagna che corrisponde al piede del campione;

G: percentuale della componente ghiaiosa del campione ottenuta attraverso l'analisi granulometrica in laboratorio con valori da 0 a 100, sommato a G, S, A deve dare 100;

S: percentuale della componente sabbiosa del campione ottenuta attraverso l'analisi granulometrica in laboratorio con valori da 0 a 100, sommato a G, S, A deve dare 100;

L: percentuale della componente limosa del campione ottenuta attraverso l'analisi granulometrica in laboratorio con valori da 0 a 100; sommato a G, S, A deve dare 100;

A: percentuale della componente argillosa del campione ottenuta attraverso l'analisi granulometrica in laboratorio con valori da 0 a 100, sommato a G, S, A deve dare 100;

litotype: attribuzione alla litofacies di appartenenza desunto dalle informazioni stratigrafiche;

gamma_n: determinazione del peso di volume naturale del terreno, espresso in kN/m^3;

gamma_dry: determinazione del peso di volume naturale del terreno, espresso in kN/m^3;

X100h2o: percentuale d'acqua contenuta nel campione, espresso in percentuale da 0 a 100;

e: indice dei vuoti del campione (valore assoluto, in decimali);

porosity: misura della porosità del campione espressa in percentuale;

sat_ratio: grado di saturazione del campione espresso in percentuale ;

f_LL: limite liquido determinato in laboratorio per la frazione fine (diametro <tot mm), espresso in %;

f_LP: limite plastico, determinato in laboratorio per la frazione fine, espresso in percentuale;

*G_Dr:*densità relativa, misurato per materiale a granulometria grossolana in percentuale;

K: coefficiente di permeabilità misurato in m/s;

remarks: è un campo facoltativo dove si possono inserire notazioni od informazioni sull'esecuzione della caratterizzazione geotecnica o od altro che si ritiene rilevante o di aiuto nella comprensione dei risultati illustrati.

11. LS: contiene i risultati dei parametri geotecnici ottenuti dalle prove di laboratorio di taglio diretto, prove triassiali e quella di espansione laterale libera; è l'entità che rappresenta l'informazione numerica su alcuni parametri ottenuti da specifiche prove di laboratorio, ampiamente diffuse. Essa è figlia dell'entità campione (**sa**), in quanto senza il prelievo di campione indisturbato, non sarebbe possibile effettuare prove di laboratorio.

id_summ*:* identificativo della raccolta dei risultati di laboratorio (chiave primaria);

id_sample: chiave esterna che permette di individuare il campione sul quale si sono ottenuti i risultati dalle prove di laboratorio di taglio diretto, triassiali e quella di espansione laterale libera;

C_TD: valore della coesione calcolata attraverso la prova di taglio diretto in kPa;

Phi_TD: valore dell'angolo di attrito ottenuto attraverso la prova di taglio diretto(in gradi);

Pc: valore della resistenza alla compressione semplice, misurata in kPa,

Cuu: valore della coesione ottenuta attraverso la prova triassiale non consolidata e non drenata; misurata in kPa

Phi_TX: valore dell'angolo d'attrito ottenuto attraverso prove triassiali (in gradi)

remarks: è un campo facoltativo dove si possono inserire notazioni od informazioni sul sommario dei risultati delle principali prove geotecniche o od altro che si ritiene rilevante o di aiuto nella comprensione dei risultati illustrati.

12. StL: è l'entità che rappresenta le prove di laboratorio più comunemente effettuate per la caratterizzazione geotecnica dei terreni; essa è figlia dell'entità campione (**sa**), in quanto senza il prelievo di campione indisturbato, non sarebbe possibile effettuare prove di laboratorio; ogni occorrenza corrisponde ad una prova di laboratorio;

***id_lab**:* identificativo della prova di laboratorio (chiave primaria);

id_sample: chiave esterna che permette di individuare il campione sul quale si sono effettuate le prove di laboratorio standard;

test_type: è l'attributo che descrive la tipologia di prove di laboratorio per la carettirizzazione geotecnica dei terreni e i valori possibili che può assumere sono relative alle prove di laboratorio standard più diffuse:

a. TAGLIO DIRETTO
b. EDOMETRICA
c. TRIASSIALE (CD, CIU, UU)
d. ESPANSIONE LATERALE LIBERA (ELL)

lab_name: attributo che indica il nome del laboratorio che ha eseguito la prova standard;

remarks: è un campo facoltativo dove si possono inserire notazioni od informazioni sull'esecuzione della prova geotecnica o od altro che si ritiene rilevante;

13. **SpL**: è l'entità che rappresenta le prove di laboratorio "speciali, non diffuse nella maggior parte dei laboratori e necessarie per la caratterizzazione geotecnica dei terreni a bassissime deformazioni; sono analisi che si effettuano principalmente per conoscere la risposta sismica dei materiali, in termini di rigidezza e smorzamento. Essa è figlia dell'entità campione (**sa**), in quanto senza il prelievo di campione indisturbato, non sarebbe possibile effettuare prove di laboratorio; ogni occorrenza corrisponde ad una prova di laboratorio;

id_lab*:* identificativo della prova di laboratorio non ordinarie (chiave primaria);

id_sample: chiave esterna che permette di individuare il campione sul quale si sono effettuate le prove di laboratorio non ordinarie;

test_type: è l'attributo che descrive la tipologia di prova di laboratorio per la caratterizzazione geotecnica sismica dei materiali e il dominio di valori possibili che può assumere sono relative alle prove sismiche più diffuse:

a. COLONNA RISONANTE (RC)
b. TAGLIO TORSIONALE CICLICO
c. TAGLIO SEMPLICE CICLICO A DOPPIO PROVINO (DSDSS)
d. TAGLIO SEMPLICE CICLICO (NGI)
e. BENDER ELEMENTS
f. TRIASSIALE CICLICA

lab_name: attributo che indica il nome del laboratorio che ha eseguito la prova sismiche di laboratorio;

remarks: è un campo facoltativo dove si possono inserire notazioni od informazioni sull'esecuzione della prova geotecnica o od altro che si ritiene rilevante;

14. **Hydro**: entità che rappresenta la strumentazione piezometrica installa in foro per il rilevamento dei livelli di falda o di misure freatiche riportate sulla stratigrafia di cantiere ed effettuate durante il sondaggio; è un'entità figlia di **Bh**;

***id_hydro**:* identificativo del piezometro installato o di una misura effettuata durante la perforazione (chiave primaria);

id_location: chiave esterna che permette di individuare il sondaggio in cui sono stati installati i piezometri;

piez_type: : è l'attributo che descrive la tipologia dei piezometri più frequentemente installati in foro; sono stati considerati i seguenti tipi:

a. TUBO APERTO
b. TIPO CASAGRANDE

length_m: spessore del tratto finestrato in metri;

install_data: data di installazione del piezometro espresso formato gg/mm/aaaa;

depth_m: profondità espressa in metri rispetto al piano campagna a cui è posta la base della finestratura del piezometro;

link_excel: campo booleano (sì/no) che indica se è presente o meno la documentazione della prova in formato digitale .xls;

remarks: è un campo facoltativo dove si possono inserire notazioni od informazioni sull'installazione dei piezometri o od altro che si ritiene rilevante;

15. **pHead**: sono le misure piezometriche relative all'entità **Hydro**, di cui è figlia; si contempla la possibilità di avere un massimo di tre piezometri e quindi di

falde rinvenibili in un singolo foro di sondaggio; opportunamente interpretata con le informazioni presenti in **Hydro**, questa entità può permettere di ricostruire la quota piezometrica nell'area e localizzare l'acquifero di appartenenza delle falde presenti; ogni occorrenza corrisponde ad un piezometro installato o alla lettura della falda durante la perforazione;

id: identificativo della misura piezometrica (chiave primaria);

id_hydro: chiave esterna che permette di individuare il piezometro in cui è stato misurato il livello della falda;

date: data in cui viene effettuata la misura del livelli piezometrico espresso formato gg/mm/aaaa; qualora si voglia inserire solo il valore medio delle misure relativo ad un periodo di tempo non esprimibile nel formato definito, occorre specificarlo nell'attributo *remarks*;

phreatic_1: misura piezometrica relativa al piezometro più superficiale nel sondaggio in cui ne sono installati più di uno o lettura piezometrica dell'unico piezometro installato o quella relativa alla lettura durante la perforazione;

phreatic_2: misura piezometrica relativa al piezometro più superficiale dopo quello inserito in *phreatic_1* se nel sondaggio ne sono installati più di uno;

phreatic_3: misura piezometrica relativa al piezometro più superficiale dopo quello inserito in *phreatic_2* se nel sondaggio ne sono installati più di due;

remarks: è un campo facoltativo dove si possono inserire notazioni od informazioni sulle misure freatiche, come il periodo di misura, o altro che si ritiene rilevante per la comprensione delle misure stesse;

16. **pLinK**: è un'entità "astratta" in quanto rappresenta gli *hyperlinks*, cioè i collegamenti ipertestuali che permettono di ottenere la documentazione tecnica o i certificati delle prove o qualsiasi altro materiale disponibile in formato digitale relativa ad un determinato sondaggio; gli attributi necessari sono i seguenti:

***id**:* identificativo dell'entità e sua chiave primaria;

cod_id: chiave esterna che relaziona la documentazione digitale disponibile tramite l' *hyperlink* al sondaggio a cui appartengono in **Bh**;

hyper: attributo che definisce il percorso all'interno del disco fisso o del server dove è fisicamente ubicato il file relativo alla documentazione specificata;

topic: contiene l'informazione sulla tipologia della relazione o meglio indicazioni sul contenuto della documentazione specificata nel percorso *hyper*;

remarks: è un campo facoltativo dove si possono inserire notazioni od informazioni sulla documentazione fornita, su eventuali parti mancanti o su quelle particolarmente importanti, o altro;

In totale per una modellizzazione consistente del sottosuolo ai fini pericolosità geologica, considerando gli aspetti geologico-stratigrafici, geotecnici e relativi a misure di falda, si sono individuate 16 entità che permettono di gestire ed integrare le diverse informazioni in modo rapido e sicuro.

4.2.2 Le relazioni

Le relazioni tra entità rappresentano i legami logici, significativi per l'applicazione di interesse, tra due o più entità. Nel modello concettuale in Figura 28 le associazioni sono rappresentate con una freccia che parte dall'entità "genitore", o tabella origine, ed arriva all'entità "figlio", o tabella di destinazione. In Tabella 7 si trovano le relazione definite nel modello del sottosuolo. La cardinalità viene specificata per ciascuna partecipazione di entità a una relazione e descrive il numero minimo e massimo di occorrenze di relazione a cui una occorrenza di entità può partecipare. Infatti le relazioni sono a tutti gli effetti da considerarsi una tabella le cui occorrenze sono relazioni matematiche tra le occorrenze delle entità che associa. La cardinalità ci dice quante volte, in una relazione tra entità,

un'occorrenza di una di queste entità può essere legata a occorrenze delle altre entità coinvolte.

RELAZIONI			
CARDINALITÀ		GENITORE	FIGLIO
1:m	UNO A MOLTI	Project	Bh
1:mc	UNO A MOLTI O NESSUNO	Bh	St Gts sa Hydro pLink
		St	Hy sa SPT Hydro
		Gts	SPT mCPT
		Vps	V
		sa	StL SpL
		Hydro	pHead
0..1	UNO A UNO O A NESSUNO	Bh	Vps
		sa	LS

Tabella 7: Schematizzazione delle entità definite per la modellizzazione del sottosuolo, associate al tipo di informazioni della realtà investigata esse rappresentano; L'entità GENITORE è sempre indicata con *1* e l'entità FIGLIO può essere *m (molti), (molti o nessuno)* oppure *0..1 (uno o nessuno)*. Per esempio l'occorrenza dell'entità progetto, **Project**, deve avere almeno 1 oppure molte occorrenze associate nella tabella dei sondaggi **Bh**, in quanto ad una campagna di indagini deve essere appartenere almeno uno oppure diversi sondaggi.

Ad ogni relazione è stato assegnato un nome univoco e di seguito vengono descritte. E' importante sottolineare che in realtà le relazioni non hanno un verso, ma una volte definite secondo quanto si vede in Tabella 7, esse valgono in entrambi i sensi. Questo significa che dall'entità Genitore si ottiene le occorrenze dell'entità Figlio, ma è vero anche il contrario.

a. CARDINALITÀ 1:m

1. ***ProjectHasBh*** – l'entità **Project** deve avere almeno 1 o molte occorrenze nell'entità **Bh**. L'entità **Bh** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **Project**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni campagna di indagini o fonte di dati (occorrenza di **Project**) si avrà almeno un sondaggio (occorrenza di **Bh**) da inserire e ogni sondaggio inserito apparterrà ad una sola fonte o campagna ;

b. CARDINALITÀ 1:mc

2. ***BhHasSt*** – l'entità **Bh** può avere nessuna, 1 o molte occorrenze nell'entità **St**. L'entità **St** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **Bh**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni sondaggio (occorrenza di **Bh**) si possono avere descritti 0, 1 o molti strati (occorrenza di **St**) e ogni strato inserito può appartenere ad un solo sondaggio ;
3. ***BhHasGst*** – l'entità **Bh** può avere nessuna, 1 o molte occorrenze nell'entità **Gts**. L'entità **Gts** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **Bh**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni sondaggio (occorrenza di **Bh**) si possono avere effettuato 0, 1 o molti indagini geotecniche in situ (occorrenza di **Gts**) e ogni indagine eseguita può appartenere ad un solo sondaggio;
4. ***BhHassa*** – l'entità **Bh** può avere nessuna, 1 o molte occorrenze nell'entità **sa**. L'entità **sa** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **Bh**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni sondaggio (occorrenza di **Bh**) si possono avere prelevato 0, 1 o molti campioni (occorrenza di **sa**) e ogni campione prelevato può appartenere ad un solo sondaggio;
5. ***StHasHy*** l'entità **St** può avere nessuna, 1 o molte occorrenze nell'entità **Hy**. L'entità **Hy** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **St**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni strato (occorrenza di **St**) si possono ipotizzare 0, 1 o molti strati appartenenti a diverse formazioni geologiche (occorrenza di **Hy**) e ogni ipotesi si riferisce ad un solo strato realmente descritto;
6. ***StHassa*** - l'entità **St** può avere nessuna, 1 o molte occorrenze nell'entità **sa**. L'entità **sa** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **St**. Tale relazione comporta che per ogni strato (occorrenza di **St**) si possono avere o 0, 1 o molti campioni (occorrenza di **sa**), ma ogni campione prelevato può appartenere ad un solo strato. Nella realtà la situazione è più complessa ed uno campione si può trovare al limite tra due strati; in quel caso lo si attribuisce allo strato più prelevato o ci si orienta con i dati di laboratorio;ad ogni modo al verificarsi del caso limite lo si evidenzia nell'attributo *remarks* della tabella **sa**;
7. ***StHasSPT*** - l'entità **St** può avere nessuna, 1 o molte occorrenze nell'entità **SPT**. L'entità **SPT** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **St**. Tale relazione comporta che per ogni strato (occorrenza di **St**) si possono avere o 0, 1 o molte

prove penetrometriche statiche a diversa profondità (occorrenza di SPT), ma ogni SPT eseguita può appartenere ad un solo strato. Nella realtà la relazione non è così netta e vale quanto specificato nella relazione 6.;

8. ***StHasHydro*** - l'entità **St** può avere nessuna, 1 o molte occorrenze nell'entità **Hydro**. L'entità **Hydro** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **St**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni strato (occorrenza di **St**) si possono ipotizzare 0, 1 o molti piezometri installati (occorrenza di **Hydro**), ma ogni piezometro si riferisce ad un solo strato; vedi quanto scritto in 6.;
9. ***saHasStL*** - l'entità **sa** può avere nessuna, 1 o molte occorrenze nell'entità **StL**. L'entità **StL** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **sa**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni campione (occorrenza di **sa**) si possono avere effettuato 0, 1 o molte prove geotecniche standard di laboratorio (occorrenza di **StL**)e ogni prova eseguita può riferirsi ad un solo campione;
10. ***saHasSpL*** - l'entità **sa** può avere nessuna, 1 o molte occorrenze nell'entità **SpL**. L'entità **SpL** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **sa**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni campione (occorrenza di **sa**) si possono avere effettuato 0, 1 o molte prove geotecniche di laboratorio per la caratterizzazione sismica (occorrenza di **SpL**)e ogni prova eseguita può riferirsi ad un solo campione;
11. ***GtsHasmCPT*** **–** l'entità **Gts** può avere nessuna, 1 o molte occorrenze nell'entità **mCPT** L'entità **mCPT** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **Gts**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni sondaggio (occorrenza di **Gts**) si possono avere 0, 1 o molte misure relative all'avanzamento della prova pentrometrica statica (occorrenza di **mCPT**) e ogni misura può appartenere ad una e una sola prova CPT;
12. ***GtsHasSPT*** **–** l'entità **Gts** può avere nessuna, 1 o molte occorrenze nell'entità **SPT** L'entità **SPT** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **Gts**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni sondaggio (occorrenza di **Gts**) si possono avere 0, 1 o molte misure relative all'avanzamento della prova pentrometrica dinamica (occorrenza di **SPT**) e ogni misura può appartenere ad una e una sola prova SPT;
13. ***VpsHasV*** - l'entità **Vps** può avere nessuna, 1 o molte occorrenze nell'entità **V**. L'entità **V** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **Vps**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni sondaggio (occorrenza di **Vps**) si possono avere

effettuato 0, 1 o molti indagini geotecniche in situ (occorrenza di **V**)e ogni indagine eseguita può appartenere ad un solo sondaggio;

14. ***BhHasHydro*** – l'entità **Bh** può avere nessuna, 1 o molte occorrenze nell'entità **Hydro**. L'entità **Gts** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **Bh**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni sondaggio (occorrenza di **Bh**) può avere 0, 1 o molti piezometri installati a profondità diverse (occorrenza di **Hydro**)e ogni piezometro installato può appartenere ad un solo sondaggio;
15. ***HydroHaspHead*** – l'entità **Hydro** può avere nessuna, 1 o molte occorrenze nell'entità **pHead**. L'entità **pHead** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **Hydro**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni piezometro installato (occorrenza di **Hydro**) si possono avere 0, 1 o molti misure piezometriche effettuate in giornate ed orari diversi (occorrenza di **pHead**) e ogni misura può essere relativa ad un solo piezometro;
16. ***BhHaspLink*** - l'entità **Bh** può avere nessuna, 1 o molte occorrenze nell'entità **pLink**. L'entità **pLink** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **Bh**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni sondaggio (occorrenza di **Bh**) si possono avere 0, 1 o molti *file*s di documentazione (occorrenza di **pLink**) e ogni documentazione si riferisce alle informazioni di un solo sondaggio;

c. CARDINALITÀ 0..1

17. ***BhHasVps*** - l'entità **Bh** può avere nessuna o una sola occorrenza nell'entità **Vps**. L'entità **Vps** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **Bh**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni sondaggio (occorrenza di **Bh**) si possono avere effettuato 0 o 1 indagine sismica (occorrenza di **Vps**) e ogni indagine sismica eseguita può essere relativa ad un solo sondaggio;
18. ***saHasLS*** - l'entità **sa** può avere nessuna o una sola occorrenza nell'entità **LS**. L'entità **LS** può appartenere ad una sola occorrenza dell'entità **sa**. Tale relazione deriva dal fatto che per ogni campione (occorrenza di **sa**) si possono avere effettuato 0 o 1 serie di prove geotecniche di laboratorio (occorrenza di **LS**), ottenendo una serie di risultati, e ogni gruppo di parametri determinati può riferirsi ad un solo sondaggio;

Le occorrenze delle 16 entità descritte nel capitolo precedente sono associate tra loro attraverso 18 relazioni con cardinalità diversa in funzione del legame logico che

sussiste nella realtà tra le molteplici informazioni rappresentate. Le relazioni *1:mc* e *0..1* prevedono la possibilità di non avere alcuna informazione (nessuna, 0) rispetto ad un foro di sondaggio, mentre un progetto o fonte inserita deve avere sempre almeno un sondaggio da inserire nella banca dati.

4.2.3 Le Interrogazioni

Come specificato nella metodologia e ribadito nell'introduzione alla struttura dei dati in questo Capitolo, è importante aver definito in linea di massima le interrogazioni che si vogliono effettuare sulla banca dati per definire con esattezza la geometria ed il formato degli attributi delle entità. Le interrogazioni possibili si suddividono in (1) *queries* spaziali e (2) *queries* tematiche per attributi alfanumerici.

Le interrogazioni geografiche sono quelle che influenzano la geometria e si basano su regole topologiche ossia sui rapporti che ci sono tra le primitive geometriche punto, linea e poligono. Sono propri della topologia i concetti di adiacenza, distanza, vicinanza, identità, appartenenza. Tramite le regole topologiche è possibile sapere per esempio quanti punti di uno strato informativo, ricadono all'interno di poligoni di un altro strato; quali sono i punti ad una certa distanza da una linea o poligono, quali sono i poligono intersecati dalle linee. Questi esempi sono stati fatti per rendere chiaro come la scelta della geometria dell'entità può pregiudicare le *queries* spaziali a cui può partecipare. Per esempio considerando l'entità del sottosuolo Bh, rappresentante in pratica i sondaggi, definendola con una geometria puntiforme, può partecipare alle *queries* "quali sondaggi si trovano su tale formazione geologica?", "quali sondaggi si trovano a meno di 100 metri dal fiume Tevere o da una certa strada?". Affinché le *queries* appena definite restituiscano un risultato, che è una selezione di dati, necessariamente l'entità che rappresenta la geologia di superficie dovrà essere di tipo poligono, mentre per l'altra dovrebbero essere preferibilmente di tipo linea.

Le interrogazioni alfanumeriche o per attributo sono quelle che definiscono gli attributi e il loro formato, oltre alle relazioni. Tali *queries* possono essere più o meno complesse e di seguito se ne fanno degli esempi con un grado di selezione maggiore:

1. Quanti sono i sondaggi del tipo a?
2. Quanti sono i sondaggi di tipo a che nella loro stratigrafia presentano tale formazione?

3. Quanti sono i sondaggi di tipo a che nella loro stratigrafia presentano tale formazione ad una quota compresa tra i 10 e i 15 metri slm?
4. Quanti sono i sondaggi di tipo a che nella loro stratigrafia presentano tale formazione ad una quota compresa tra i 10 e i 15 metri slm e che sono stati campionati?
5. Quanti sono i sondaggi di tipo a che nella loro stratigrafia presentano tale formazione ad una quota compresa tra i 10 e i 15 metri slm, che sono stati campionati e che sono delle argille?
6. Quanti sono i sondaggi di tipo a che nella loro stratigrafia presentano tale formazione ad una quota compresa tra i 10 e i 15 metri slm, che sono stati campionati e che sono delle argille normalconsolidate?
7. …e così via

Naturalmente la selezione restituita può anche essere vuota, qualora non ci siano record che soddisfino le condizioni imposte nella *query*. Per questo tipo di interrogazioni viene utilizzato un linguaggio specifico dedicato alle banche relazionali, SQL (*Structured Query Language*) che utilizza operatori logici e numerici.
Nel caso della *query* 3, mentre tipo di sondaggio e formazione geologica possono essere attributi alfanumerici, la quota deve essere numerica. In più nel database si devono considerare le informazioni atomiche e quindi la quota assoluta sarà derivata dall'operazione matematica tra la quota di boccapozzo e la distanza dal piano campagna con la formula [q_slm] – [From]. Si ricorda che il campo [q_slm] è un attributo della tabella **Bh**, mentre [From] appartiene a **St**. L'operazione è possibile, come del resto le diverse *queries*, solo perché le tabelle sono in relazione tra loro così come definito nel Paragrafo precedente 4.2.2.
E' infine possibile effettuare interrogazioni miste che permettono di incrociare le informazioni geografiche con quelle alfanumeriche.

In questo paragrafo non si illustrano tutte le *queries* possibili, in quanto in linea teorica possono essere infinite nell'ambito delle relazioni e attributi definibili. Ciò che si è voluto evidenziare è la possibilità fondamentale di ottenere informazione secondo criteri di selezione geografica – topologica e per attributi primari e derivati. Questo lascia intuire l'enorme potenziale della banca dati che contiene dati semplici di base che sono alla base di qualsiasi studio di pericolosità, indipendentemente dai criteri specifici di valutazione vengano considerati. Il dato in questa banca dati si conferma nella sua robustezza ed

integrità come risorsa fondamentale per studi di pericolosità geologica sul territorio, che si può interpretare e manipolare con procedure diverse.

4.3 IL MODELLO LOGICO E L'AMBIENTE GIS

Definita la struttura dei dati attraverso il modello concettuale, si deve decidere quale *software* utilizzare per l'implementazione del modello. Si definisce quindi quale sarà il programma che permetterà di costruire fisicamente le tabelle dove poi si inseriranno e saranno immagazzinati i dati. Si procede quindi alla modellizzazione logica che consiste nella traduzione dello schema concettuale definito nella fase precedente, nel modello di rappresentazione dei dati adottato dal sistema di gestione di dati scelto. Il prodotto di questa fase viene denominato schema logico che fa riferimento ad un modello logico dei dati. Tale modello è dipendente dal programma di gestione ma è ancora indipendente da dettagli fisici. Nella fase metodologica di progettazione logica si devono seguire le regole di derivazione che permettono di derivare il modello logico a partire dal modello concettuale. La progettazione dei "contenitori" delle informazioni geologiche, geotecniche ed idrogeologiche ritenute fondamentali per lo studio delle pericolosità geologiche, viene ottimizzata seguendo le tre regole di normalizzazione che garantiscono l'integrità della banca dati ed evitando che le informazioni siano ridondanti e/o inconsistenti, verificando la qualità dello schema logico ottenuto.

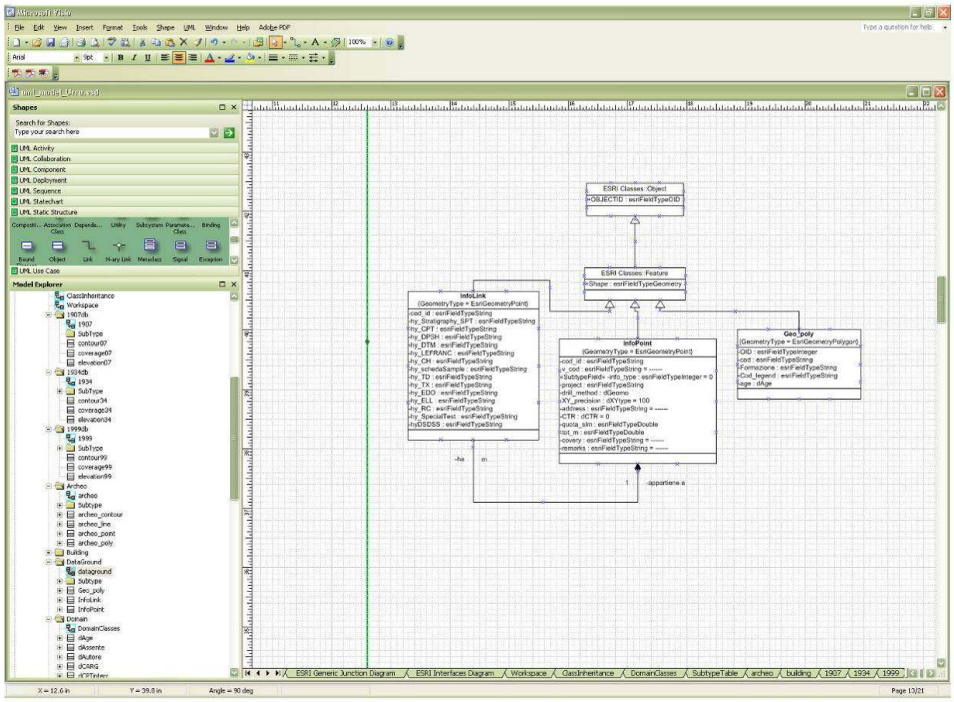


Figura 29: Stralcio del modello logico in UML. Il file XML viene creato attraverso il programma Visio di Microsoft Office; il *case* è stato compilato presso il Politecnico Federale di Zurigo (ETH), Dipartimento di Geodesia e Fotogrammetria.

Il modello concettuale è stato implementato attraverso il *software* ESRI® ArcCatalog™ 9.2 nella forma del *file geodatabase*. A questo punto il modello è stato trascritto nel linguaggio grafico UML (Unified Modeling Language) (Fig. 29). il quale è direttamente importabile in ArcCatalog™ tramite lo *schema tool* (Fig. 30). Infatti generalmente la fase di progettazione logica viene supportata da tutti gli strumenti *CASE* di ausilio allo sviluppo di base di dati. Lo *schema tool* non fa altro che tradurre in una banca dati relazionale quanto scritto in linguaggio grafico UML del file di estensione .xml. La rappresentazione grafica del modello in UML, utilizzando il diagramma delle classi (equivalenti alle nostre entità), permette di collocarsi in un contesto metodologico più ampio, in quanto è un formalismo molto diffuso, prestato dalla modellazione di applicazioni orientata agli oggetti (istanze delle classi).

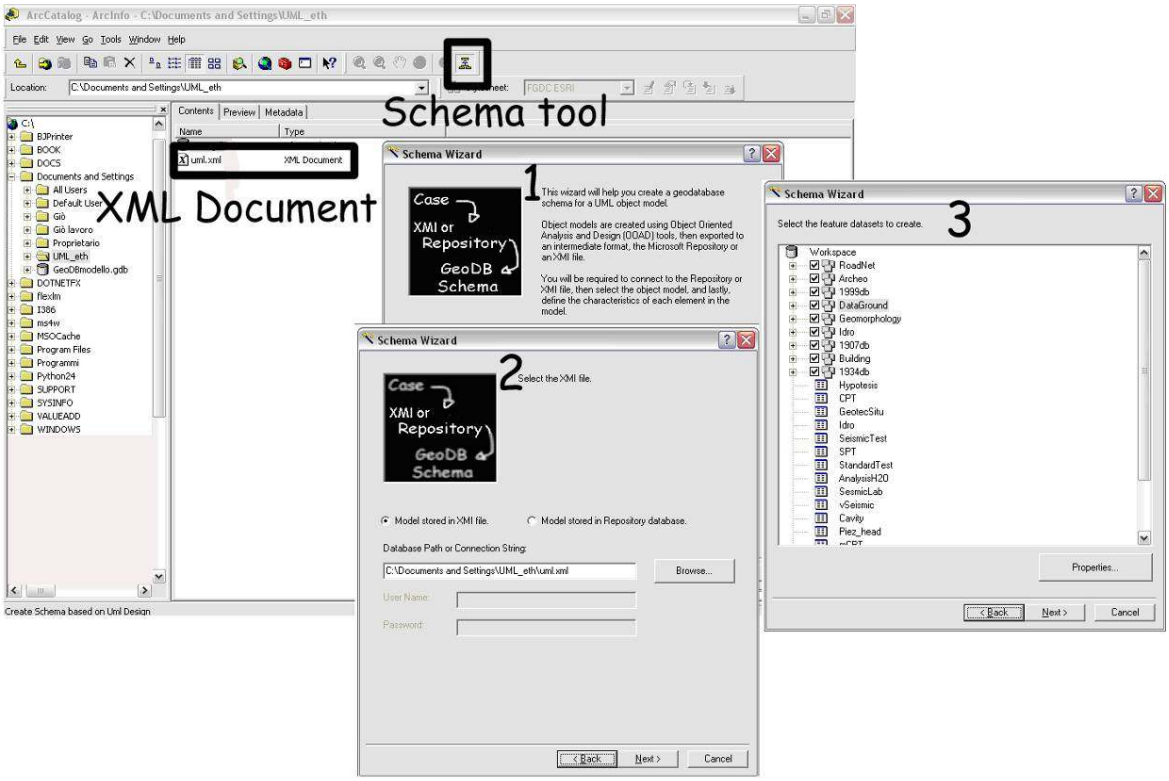


Figura 30: Visualizzazione dello Schema Tool di ArcCatalog™ e dei passaggi che portano dal file XML al geodatabase: 1) si avvia lo strumento CASE , 2) si importa il file XML scritto nel linguaggio UML, così come visualizzato in Fig. 30, 3) viene creato il geodatabase corrispondente alle istruzioni tradotte nel passaggio 2).

Nella trascrizione in *UML* le entità iniziano a concretizzarsi come tabelle in cui viene definito il formato dei diversi attribuiti, viene individuata la geometria primitiva (punto, linea, poligono) più opportuna ai fini della rappresentazione e si decidono *domains* e *subtypes,* ossia il campo di esistenza dei valori che possono essere contenuti in un

determinato campo o di creano liste di valori predefiniti come illustrato nella struttura dei dati (paragrafo 4.2.1).

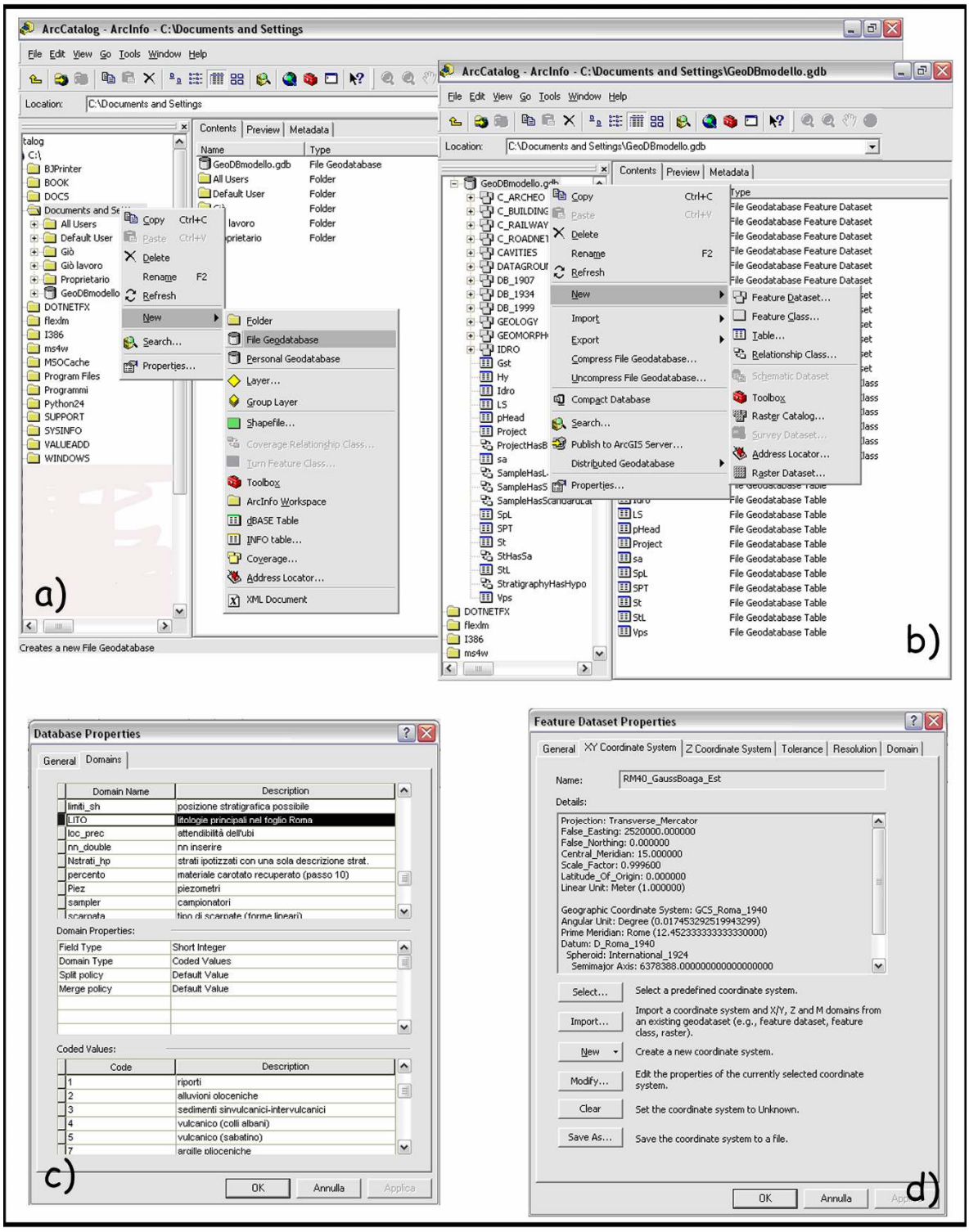


Figura 31: Implementazione alternativa del modello logico in ArcCatalog[TM]:

a) Creazione del *geodatabase*;
b) Creazione dei *feature dataset, shape file, relationship class e table*;
c) Alcuni *domain* del *database;*
d) Il sistema di riferimento, datum e proiezione cartografica utilizzata nei *feature dataset* (**Roma40, GaussBoaga fuso Est**);

In ArcCatalog™ è prevista anche una via non automatizzata per la creazione del geodatabase che viene illustrata in Fig. 31 e ci permette di spiegare il modello in termini più rigorosi per la rappresentazione geografica dei dati in ambiente GIS.

Il *geodatabase* viene definito come un *database* che è in grado di immagazzinare e gestire dati spaziali in formato vettoriale e *raster* (Fig. 31a). ArcCatalog™ consente di implementare all'interno del database *feature dataset*, *shape file*, *tabelle*, *relationship class*, *raster catalog* e *raster dataset* (Fig 31.b). I *feature datasets* e gli *shape files* contengono informazioni territoriali. In particolare i *feature dataset* sono raccolte di shape file che condividono il medesimo sistema di riferimento geografico (Fig 31.d) e sono riconducibili allo stesso tematismo definito in funzione della particolare applicazione. Il *database* ha come proprietà quella di poter conservare le informazioni relative a dei domini di valori possibili degli attributi. Tali domini, definiti *domain* nei *software* ESRI, sono liste di valori predefiniti che possono essere attribuiti a qualsiasi campo di tabelle o shape file all'interno del *geodatabase*, ammesso che abbiano lo stesso formato di dati. Ciò significa che un campo numerico di tipo *single* non può avere un *domain* di tipo testo o un campo numerico di tipo *float.* La scelta del formato è fondamentale e viene fatta conoscendo il tipo di informazione che si vorrà inserire nel campo, ma soprattutto prevedendo quali applicazioni si opereranno su esso. L'utilizzo dei *domain* riduce la possibilità di errori di battitura od errato inserimento, perché consente la sola scelta tra valori predefiniti o intervalli di valori numerici.

Inseriti i domini e definiti i *feature datasets* tematici con il sistema di riferimento opportuno, si iniziano a creare le tabelle e gli *shape files* all'interno dei *feature datasets*, definendo le relazioni tra i vari elementi presenti nel *geodatabase* forniti di informazioni alfanumeriche costruendo le *relationship class*. Lo *shape file* ha la caratteristica che nella tabella dei suoi attributi ci sia un campo dove è inserita la geometria dell'entità rappresentata (campo: *Geometry*). Tutte le occorrenze che appartengono ad uno *shape file*, oltre a condividere gli stessi attributi (coerente con la prima forma normale), saranno rappresentate geometricamente allo stesso modo. In Figura 32a è illustrato un esempio di tabella associata ad una geometria puntiforme. Lo *shape* esemplificato è l'entità dei sondaggi **Bh** e i campi rappresentano i suoi attributi, quelli definiti nel modello concettuale (Paragrafo 4.1.1). Le relazioni definite nel Paragrafo 4.1.2 vengono introdotte nella forma di classi di relazioni, *relationship class*, che contiene tutte le specifiche necessarie (origine-destinazione, chiave primaria ed esterna, cardinalità). Automaticamente le tabelle-entità coinvolte nelle classi di relazioni sia come origine sia come destinazione, acquisiscono

l'informazione su come associarsi. Le relazioni in cui partecipa lo *shape file* vengono mostrate come parte integrante delle informazioni utili (Fig 32.b). La possibilità di associare tabelle a shape file rende possibile per esempio interrogare in modalità spaziale il geodatabase ed ottenere le informazioni non solo contenute nello *shape* stesso, ma anche tutte quelle che riguardano l'interrogazione spaziale effettuata, presenti in tutte le altre tabelle relazionate ad esso. E' vero però anche il contrario, per quanto specificato in 4.1.2 sulla reciprocità delle relazioni, cioè da un interrogazione sugli attributi di una tabella relazionata allo *shape*, si può risalire alla posizione sul territorio a cui si riferisce, sebbene non sia essa stessa contenuta in uno *shape*.

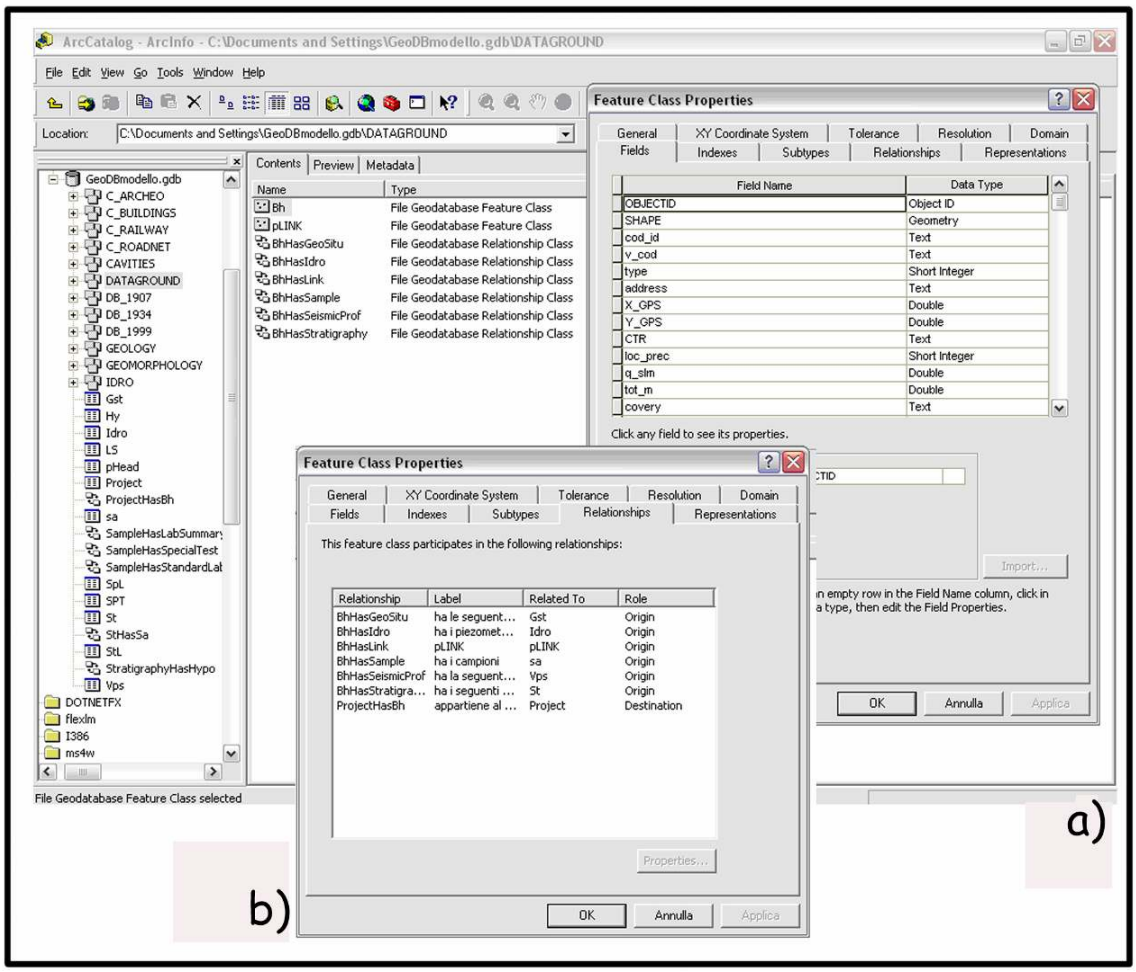


Figura 32: Esempio di visualizzazione delle proprietà di uno shape file contenuto in un feature dataset all'interno del geodatabase. In a) sono visualizzati i campi relativi allo shape file **Bh** con il formato definito in base al tipo di dato; in b) sono descritte le *relationship class* a cui partecipa lo *shape file*;

Il modello del sottosuolo sviluppato nel modello concettuale è stato implementato, ma per poter trattare la pericolosità considerando anche dati topografici e relativi ad altri tematismi territoriali utili ai fini della valutazione, è stato integrato, inserendo altre entità indipendenti

dall'entità **Bh.** L'integrazione del modello del sottosuolo con altre informazioni rilevanti ai fini applicativi del sistema informativo geografico, è rappresentata in Fig 33. Sono state individuati altri 11 aree tematiche, rappresentate dai *feature dataset*, oltre a quello relativo alle informazioni del sottosuolo. Nella Tabella 8 è presentata una sintesi del geodatabase, delle scelte di rappresentazione geometrica delle entità e delle relazioni considerate essenziali per lo scopo prefissato.

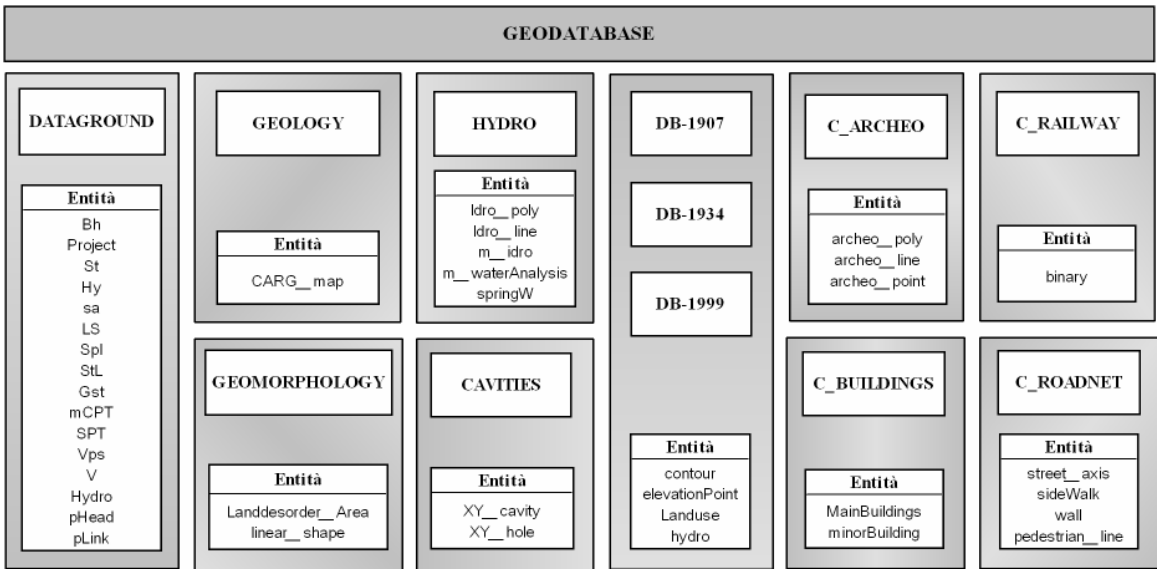


Figura.33: Insieme di tutti i feature dataset e relative entità implementate nel geodatabase per lo studio di alcuni aspetti della pericolosità geologica; si rimanda al testo per la spiegazione dei diversi tematismi e delle diverse entità;

Di seguito si illustra quanto riassunto nella Tabella 8:

1. DATAGROUND - Tematismo che contiene le informazioni del sottosuolo modellizzate ed illustrate nei paragrafi precedenti. Si è scelto di rappresentare con geometria puntiforme la sola entità **Bh**, in quanto le altre informazioni fanno sempre riferimento alla stessa ubicazione. Considerare altre entità come *shape* avrebbe comportato una duplicazione dell'informazione spaziale e non si sarebbe rispettato le regole di normalizzazione. Il fatto che anche **pLink** sia uno *shape* puntiforme è un artificio per poter attivare la possibilità di collegamenti ipertestuali.

2. GEOLOGY – Tematismo geologico che contiene informazioni geologiche di superficie e sui lineamenti tettonici. Sono presenti al suo interno i seguenti *shape files*:

I. *CARG_map*: geologia di superficie rappresentata con una geometria poligonale,

II. *Fault*: elementi tettonici lineari, faglie;

3. GEOMORFOLOGY - Tematismo geomorfologico che contiene informazioni sulle forme del paesaggio e dissesti. Sono presenti al suo interno i seguenti *shape files*:

II. *LandDesorder*: aree di dissesto per fenomeni gravitativi sul territorio, ottenuti da rilevamenti, foto aree, immagini satellitari, ecc. Ha una geometria poligonale;

III. *Linear_shape*: elementi geomorfologici rappresentabili linearmente come orli di scarpate, trincee, nicchie di distacco, ecc;

4. HYDRO - Tematismo idrogeologico e geochimico che contiene informazioni sui corsi d'acqua, sorgenti, laghi e sulle misure che è possibile effettuare. E' una classe tematica che dovrebbe ospitare relazioni topologiche, per vincolare le misure a luoghi dove vi è presenza d'acqua. Sono presenti al suo interno i seguenti *shape files*:

IV. *Hydro_line*: corsi d'acqua e canali artificiali non a misura rappresentabili con linee;

V. *Hydro_poly*: corsi d'acqua, canali e laghi, rappresentabili tramite poligoni;

VI. *m_Hydro*: misure idrometriche, come per esempio quelle in alveo, rappresentate come punti sul luogo di misura;

VII. *m_waterAnalysis*: misure chimico-fisiche di acque in sorgenti corsi d'acqua ma non in pozzo o sondaggio; i luoghi di misura sono rappresentati come punti;

VIII. *springW*: ubicazione delle sorgenti rappresentate da punti;

5. CAVITIES – Tematismo che rappresenta le informazioni su cavità antropiche, non derivate da sondaggi, e sul crollo e dissesti dovuti alla presenza delle stesse. Sono presenti al suo interno i seguenti *shape files*:

IX. *XYcavity*: ubicazione di cavità ipogee di origine antropica (imbocco di catacombe, cave in sotterraneo, ecc) e sono rappresentati da punti;

X. *XYhole*: ubicazione dei dissesti superficiali e sotterranei, per lo più crolli o voragini, dovute a cavità antropiche e sono rappresentati come punti;

6. DB_1907 – Tematismo relative alle informazioni topografiche digitalizzate dal Piano Topografico per Roma e Suburbio del 1907-24, scala 1:5000. Sono presenti al suo interno i seguenti *shape files*:

XI. *Contour1907*: isoipse relative alla carta del 1907-24, rappresentate da linee;
XII. elevationPoint1907: punti quotati relative alla carta del 1907-24, rappresentate da punti;
XIII. *Landuse1907*: uso del suolo interpretato dalla carta del 1907-24, rappresentate da aree poligonali;
XIV. *Hydro1907*: reticolo idrografico relativo alla carta del 1907-24, rappresentate da linee;

7. DB_1934 - Tematismo relative alle informazioni topografiche digitalizzate dal Piano Topografico per Roma e Suburbio del 1934, scala 1:4000. Sono presenti al suo interno i seguenti *shape files*:

XV. *Contour1934*: isoipse relative alla carta del 1934, rappresentate da linee;
XVI. *elevationPoint1934*: punti quotati relative alla carta del 1934, rappresentate da punti;
XVII. *Landuse1934*: uso del suolo interpretato dalla carta del 1934, rappresentate da aree poligonali;
XVIII. *Hydro1934*: reticolo idrografico relativo alla carta del 1934, rappresentate da linee;

8. DB_1999 - Tematismo relative alle informazioni topografiche acquisite da Cartesia Spa, aggiornate al 1999, scala nominale 1:2000. Sono presenti al suo interno i seguenti *shape files*:

XIX. *Contour1999*: isoipse Cartesia 1999, rappresentate da linee;
XX. *elevationPoint1999*: punti quotati Cartesia 1999, rappresentate da punti;
XXI. *Landuse1999*: uso del suolo interpretato attraverso Cartesia 1999; rappresentate da aree poligonali;
XXII. *Hydro*: reticolo idrografico Cartesia 1999, rappresentate da linee;

9. C_ARCHEO – Tematismo relativo agli elementi stradali, la cui struttura di dati è dovuta a Cartesia Spa. Sono presenti al suo interno i seguenti *shape files*:

XXIII. *archeo_point:* elementi archeologici puntiformi come statue, obelischi, colonne, o che sono assimilabili a punti (piccole fontane, ecc);

XXIV. *archeo_line:* elementi archeologici assimilabili a linee (vedi mura aureliane, i muri di edifici);

XXV. *archeo_polygon*: elementi archeologici assimilabili a poligoni come edifici, monumenti, fontane, ecc;

10. C_BUILDINGS – Tematismo relativo agli elementi stradali, la cui struttura di dati è dovuta a Cartesia Spa. Sono presenti al suo interno i seguenti *shape files*:

XXVI. *MainBuildings:* singoli edifici di dimensione significativa adibiti a diversi usi (residenziale, luogo di culto, sportivo, industriale ecc, rappresentati da poligoni;

XXVII. *minorBuildings*: singoli edifici minori per importanza di destinazione d'uso e dimensione, rappresentati da poligoni;

11. C_RAILWAY – Tematismo relativo agli elementi stradali, la cui struttura di dati è dovuta a Cartesia Spa. Sono presenti al suo interno i seguenti *shape files*:

XXVIII. *binar* : rappresenta i binari nei tratti non i galleria delle linee ferroviarie e metropolitane, rappresentate da linee;

12. C_ROADNET – Tematismo relativo agli elementi stradali, la cui struttura di dati è dovuta a Cartesia Spa. Sono presenti al suo interno i seguenti *shape files*:

XXIX. *street_axis:* aste stradali, corrispondenti alla mezzeria della strada, rappresentate con linee;

XXX. *pedestrian_line:* limiti di aree pedonali compreso l'ingombro di scalinate, rappresentate come linee;

XXXI. *wall:* muri divisori, recinzioni, perimetro di aree sportive, rappresentate con linee;

XXXII. *sidewalk*: bordo dei marciapiedi, aiuole, isole pedonali, rappresentate con line.

GEODATABASE			
FEATURE DATASET TEMATISMI	SHAPE FILE ENTITÀ	TABELLE ENTITÀ	RELATIONSHIP CLASS
DATAGROUND	Bh (p) pLink (p)	Project St Hy Gts mCPT SPT Vps V sa LS StL SpL Hydro pHead	ProjectHasBh BhHasSt BhHasGts BhHasVps BhHassa BhHasHydro StHasHy saHasLS saHasStL saHasSpL BhHaspLink
GEOLOGY	CARG-map (P) Fault (L)	Attualmente non presenti o non definite ma integrabili in un secondo tempo	
GEOMORPHOLOGY	LandDesorder_Area (P) linear_shape (L)		
HYDRO	springW (p) m_Hydro(p) m_waterAnalysis (p) Hydro_line (L) Hydro_poly (P)		
CAVITIES	XY_cavity (p) XY_hole (p)		
DB_1907	Contour1907 (L) elevationPoint1907 (p) Hydro1907 (L) Landuse1907 (P)		
DB_1934	Contour1934 (L) elevationPoint1934 (p) Hydro1934 (L) Landuse1934 (P)		
DB_1999	Contour1999 (L) elevationPoint1999 (p) Hydro1999 (L) Landuse1999 (P)		
C_ARCHEO	archeo_point (p) archeo_line (L) archeo_poly (P)		
C_BUILDINGS	MainBuilding (P) minorBuilding (P)		
C_RAILWAY	binary (L)		
C_ROADNET	street_axis (L) sidewalk (L) pedestrian_line (L) wall (L)		

Tabella 8: Riassunto dell'organizzazione del *geodatabase* per lo studio di pericolosità; per la descrizione delle entità integrate rispetto al model del sottosuolo, si rimanda al testo; è da sottolineare che i *feature dataset* possono contenere solo *shape file*, classi di relazioni e relazioni topologiche, ma non tabelle, in quanto contengono unicamente l'informazione alfanumerica senza una geometria associata. Il fatto che siano state messe in corrispondenza di DATAGROUND è dovuto al tematismo, informazioni del sottosuolo

Le entità integrate sono in parte dedicate alla rappresentazione urbanistica del territorio (edifici, strade ed archeologia), dall'altra ne rappresentano la superficie "naturale" (morfologia, topografia, geologia, idrografia) per quanto la si possa definire così in un

ambiente dove l'urbanizzazione è dominante. Nell'ambito dell'analisi topografica, è stata prevista la possibilità di ottenere informazioni dalla cartografia storica georeferenziata, possibile in città con uno sviluppo urbano millenario ed utile per ricostruirne la storia antropica del territorio.

Rispetto ai dati di sottosuolo, le informazioni integrate non sono messe in relazione tramite attributi in comune, ma la loro posizione geografica permette di correlarli e relazionarli. In particolare la presenza dello *shape CARG_map* che rappresenta la geologia di superficie così come interpretata nella nuova cartografia geologica 1.10000 (Funiciello & Giordano 2008), consente di effettuale un controllo incrociato tra i dati della carta e i dati di sondaggio. Si può verificare per esempio se il primo strato interpretato al di sotto dei terreni di riporto e il medesimo di quello indicato dalla cartografia.

Nella Figura 34 si mostra l'implementazione completa del modello logico, arricchito anche delle entità sopra descritte. Ricapitolando il *geodatabase* progettato ed implementato è costituito da 12 *feature dataset* (tematismo vettoriali), costituiti da 35 *shape file* (entità con attributi geometrici), 14 tabelle (entità con la sola informazione tematica), con oltre 150 campi definiti (attributi delle entità e 18 *relationship class* (relazioni tra entità).

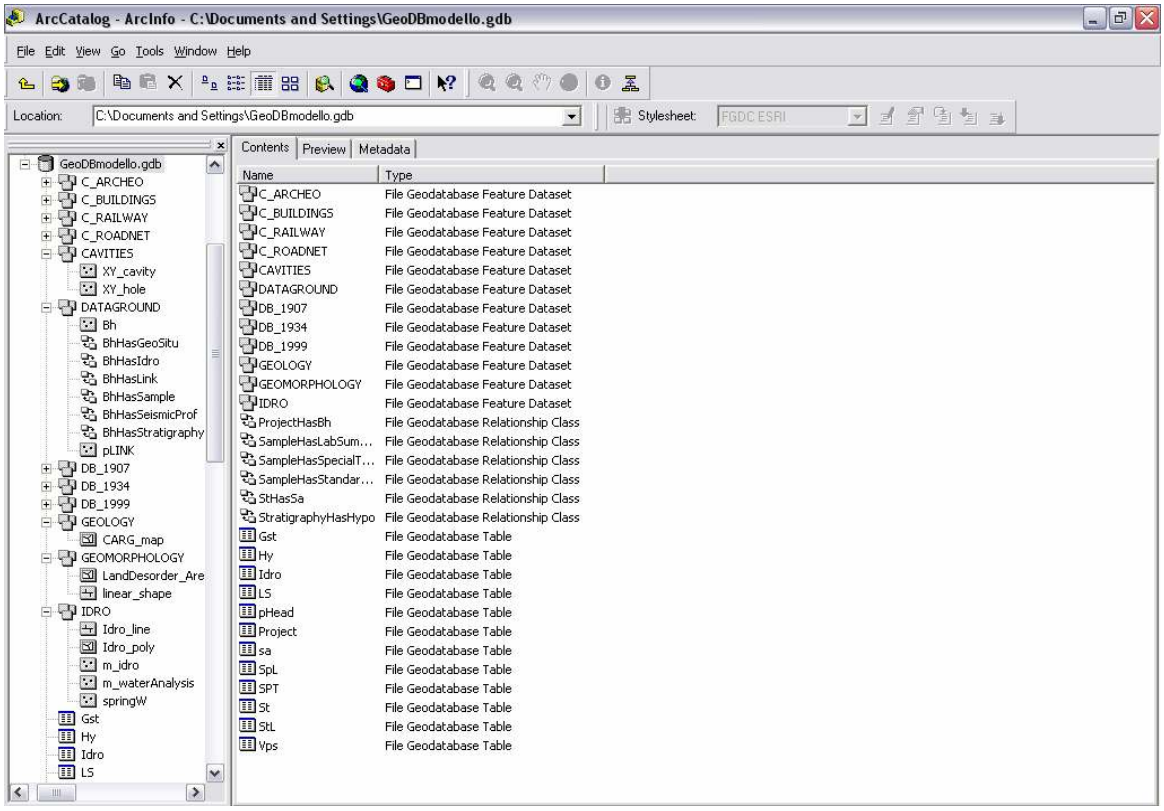


Figura 34: Implementazione del modello logico dei dati completo in ArcCatalog™ versione 9.2; si noti a sinistra "l'esplosione" di alcuni future dataset e la simbologia associata alla diversa rappresentazione geometrica dell'entità.

4.4 MODELLO FISICO E L'INSERIMENTO DEI DATI

Nell'ambito del processo di progettazione di una base di dati, la fase finale è quella di progettazione fisica, che ricevendo in ingresso lo schema logico della base di dati, le caratteristiche del sistema scelto e le previsioni sul carico applicativo, produce in uscita lo schema fisico della base di dati, costituito dalle effettive definizione delle relazioni (per esempio istruzioni in linguaggio SQL) e soprattutto delle strutture fisiche di accesso utilizzate con i relativi parametri (Atzeni *et alii* 2006). Questa fase è del tutto ingegneristica e riguarda l'organizzazione fisica dei dati e degli indici, i parametri fisici di memorizzazione dei dati. Tale fase non è stata affrontata in quanto attualmente la quantità di dati prevista è quella necessaria alla validazione del sistema informativo territoriale, quindi limitata, ma soprattutto l'approccio è stato di tipo metodologico e non operativo, teso all'ottimizzazione delle prestazioni tecnologiche.

Successivamente a completamento della fase metodologica progettuale, si è iniziato l'inserimento delle informazioni nelle tabelle del *geodatabase*, o meglio di una selezione di dati finalizzatati alla validazione della modellizzazione della struttura della base di dati, basati sulle applicazioni effettuate ed illustrate nel Capitolo 9. Prima di procedere all'inserimento dei dati, questi sono stati raccolti e selezionati criticamente in base principalmente all'attendibilità ed alla accuratezza dell'informazione. L'acquisizione dei dati ha comportato l'omogeneizzazione degli stessi durante l'inserimento che ha riguardato dati molto diversi fra loro, in alcuni casi manipolati tramite altri programmi di supporto (per esempio *excel* o *access*) e la cui variabilità è illustrata nel seguente paragrafo.

L'interfaccia di inserimento dati è fornita dalla *suite* ESRI di cui fa parte il modulo ArcCatalog™, con il modulo di visualizzazione, acquisizione, elaborazione ArcMap™. Nella Figura 36 si mostra un esempio di come appare l'interfaccia di acquisizione durante la sessione di *editing* dei dati. Prima si inserisce nella *shape* **Bh** una nuova occorrenza ossia un nuovo sondaggio (Fig. 35.a), come punto (in basso a destra della schermata sono visualizzate nel rettangolo rosso le coordinate longitudine e latitudine del punto in metri rispetto al sistema di riferimento adottato, Roma 40 – Gauss Boaga, Fuso Est, vedi paragrafo seguente). Inserito il punto è possibile compilare la tabella degli attributi di **Bh** ed in seguito inserire i dati a disposizione nelle tabelle relative, specificate precedentemente nelle relazioni. Nell'esempio si visualizza l'inserimento di un nuovo record di informazioni stratigrafiche.

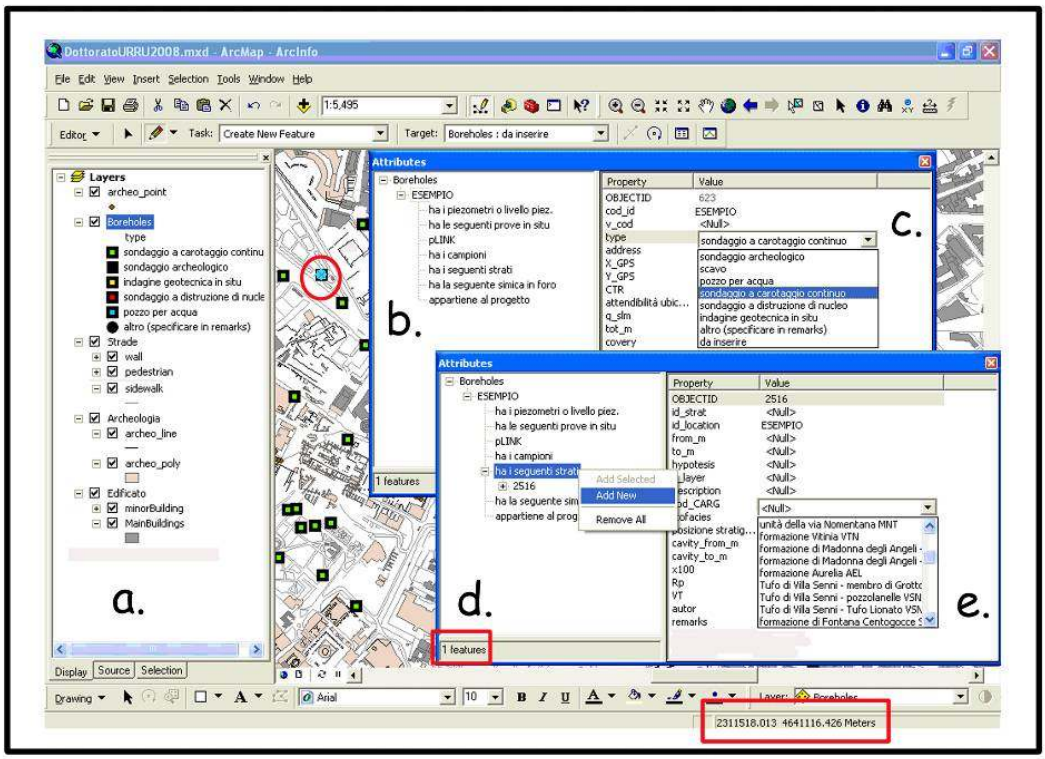


Fig. 35: Esempio dell'interfaccia di inserimento dati fornita da ArcMap™ versione 9.2; per ogni informazione puntuale inserita (a. cerchio rosso) sono subito disponibili tutte le altre tabelle ad esso correlate (b), così come nelle interrogazioni; la procedura è possibile solo durante la sessione di *editing* attiva. Nella tabella di inserimento viene indicato che si sta editando una sola *feature* (sondaggio ESEMPIO, indicato in d. rettangolo rosso) e gli attributi si riferiscono ad essa (c). Selezionando una delle tabelle correlate è possibile aggiungere, per esempio, un nuovo strato (d) descritto nella stratigrafia di cantiere del sondaggio inserito ed ottenere gli attributi relativi alla tabella **St** e compilarli (e), e così via per tutte le relazioni a cui partecipa l'occorrenza. Sono messe in evidenza per i campi *type* in **Bh** (c)e *cod-Carg* (e) in **St**, i domini, liste di valori predefiniti tra cui effettuare la scelta.

4.4.1 Eterogeneità e complessità dei dati raccolti

L'inserimento dei dati è la fase subito precedente l'avvio delle elaborazioni e quindi dello studio. E' da considerarsi una fase fondamentale perché dalla qualità e quantità dei dati inseriti dipendono in larga parte i risultati che si andranno ad ottenere. Tale fase prevede il reperimento fisico dei dati, la selezione delle informazioni valide ed affidabili, la omogeneizzazione rispetto alla struttura della banca dati ed infine l'inserimento fisico nella stessa.

Allo scopo di validare il modello dei dati proposto e sviluppato, si è proceduto alla raccolta ed all'inserimento delle informazioni nel *geodatabase*. La validazione del modello prevede la verifica dell'operatività dello strumento progettato e delle scelte condotte per ottenere un modello geologico stratigrafico e geotecnico consistente del sottosuolo così da rendere

possibile l'applicazione di procedure metodologiche non solo qualitative, ma anche semiquantitative e quantitative per la valutazione delle pericolosità geologiche.
I dati che sono stati inseriti nella banca dati provengono da diverse fonti e sono stati acquisiti in diversi formati. Nei prossimi paragrafi si descrivono, divise per tematismo, le fonti e la tipologia dei formati con i quali si è dovuto operare delle manipolazioni sia informatiche sia di contenuto prima di poterle inserire nel *geodatabase*. I dati sono stati quindi selezionati per qualità di informazione e in un secondo momento standardizzati rispetto alle specifiche del modello implementato.
I tipi di formati di dati che sono stati gestiti sono:

- dati da *pdf* o materiale cartaceo;
- dati da *database* esistenti;
- dati da mappe raster;
- dati da progetti sviluppati in ambiente CAD cartesiano, non georeferito;
- dati da progetti sviluppati in ambiente CAD georeferito;
- dati da GIS in coordinate geografiche differenti.
- dati da fogli di lavoro *excel*;

Il trattamento di tale tipologia di dati ha richiesto diversi approcci metodologici e ha posto sostanzialmente tre problematiche:

1. la georeferenziazione e l'errore planimetrico,
2. il controllo geometrico e topologico;
3. il controllo della consistenza dei valori degli attributi.

Se il secondo ed il terzo punto possono essere affrontati in modo efficace con l'utilizzo di programmi che eseguono le istruzioni di verifica ed aiutano ad individuare gli errori, il primo punto è più complesso in quanto esistono delle deformazioni che difficilmente si possono evitare. La georeferenziazione così come affrontata in questa tesi e le relative problematiche saranno illustrate nel paragrafo specifico 4.4.2.1. Un'ultima considerazione va fatta sul fatto che le operazioni di correzione degli errori, nel punto 3. possono in alcuni casi essere automatizzate (per esempio decimali dopo la virgola, tipo di formato numerico), mentre nel punto 2. sono necessariamente manuali e comportano un rallentamento non trascurabile nell'inserimento dei dati.

Il *software* utilizzato, sia nel modulo di ArcMap™ sia in quello di ArcCatalog™, permette di inserire i dati in modo rapido, una volta organizzati e sistemati in tabelle di *Access*, attraverso i rispettivi *tools*, *Load Object* e *Load Data*.

4.4.1.1 *Dati di sondaggio*

I dati di sondaggio costituiscono i dati fondamentali per il progetto e meritano una trattazione dettagliata. La loro raccolta, standardizzazione ed inserimento ha occupato circa il 40% dell'attività di dottorato, ma ha permesso di validare adeguatamente la banca dati proposta e sviluppare l'applicazione sull'area di Porta Metronia, come presentato nel Capitolo 9 PARTE SECONDA.

Le principali tipologie di dato sono relative alle seguenti fonti:

1. Metro C Spa, indagini della fase preliminare (1995-2003) con documentazione in formato *pdf* completa ed ubicazione su mappe *raster* 1:1000, da cui si è ottenuta informazione stratigrafica e geotecnica;
2. Progetto Nuova Forma Urbis (1998), acquisita in formato digitale georeferenziato da cui si è ottenuta l'informazione stratigrafica e geotecnica priva della documentazione.
3. Ventriglia 2002, acquisizione della principale fonte bibliografica per i sondaggi e le informazioni del sottosuolo nel comune di Roma, da *pdf* contenuti nel CD edito dalla Provincia di Roma, con ubicazione su mappe *raster* 1:20000, da cui si è ottenuta la solo informazione stratigrafica.

Per il loro inserimento nel *geodatabase* si è poi proceduto in tre fasi:

1. Si sono ubicati i sondaggi a partire dalla georeferenziazione delle mappe di ubicazione correlate, verificando la corretta dell'informazione confrontando la località segnalata con quella in carta.
2. Si sono inseriti i dati nelle relative tabelle cercando di rendere le informazioni confrontabili ed omogenee laddove possibile.
3. Si è infine interpretato l'informazione stratigrafica di cantiere attraverso l'attribuzione dei diversi strati alle formazioni definite nella nuova cartografia 1:10000 (Funiciello & Giordano 2008), laddove le descrizioni e le considerazioni al contorno (spessori, posizione stratigrafica, ecc) lo permettevano, e laddove non lo

era sono state attribuite alle formazioni informali individuate negli studi paleogeografici di letteratura (Parotto, 2008)

I dati inseriti coprono un'area approssimativamente di 12.3 Km^2 che da Castel Sant'Angelo si estende fino a San Giovanni in Laterano lungo la riva sinistra del fiume Tevere (Fig. 36), all'interno del centro storico della città.

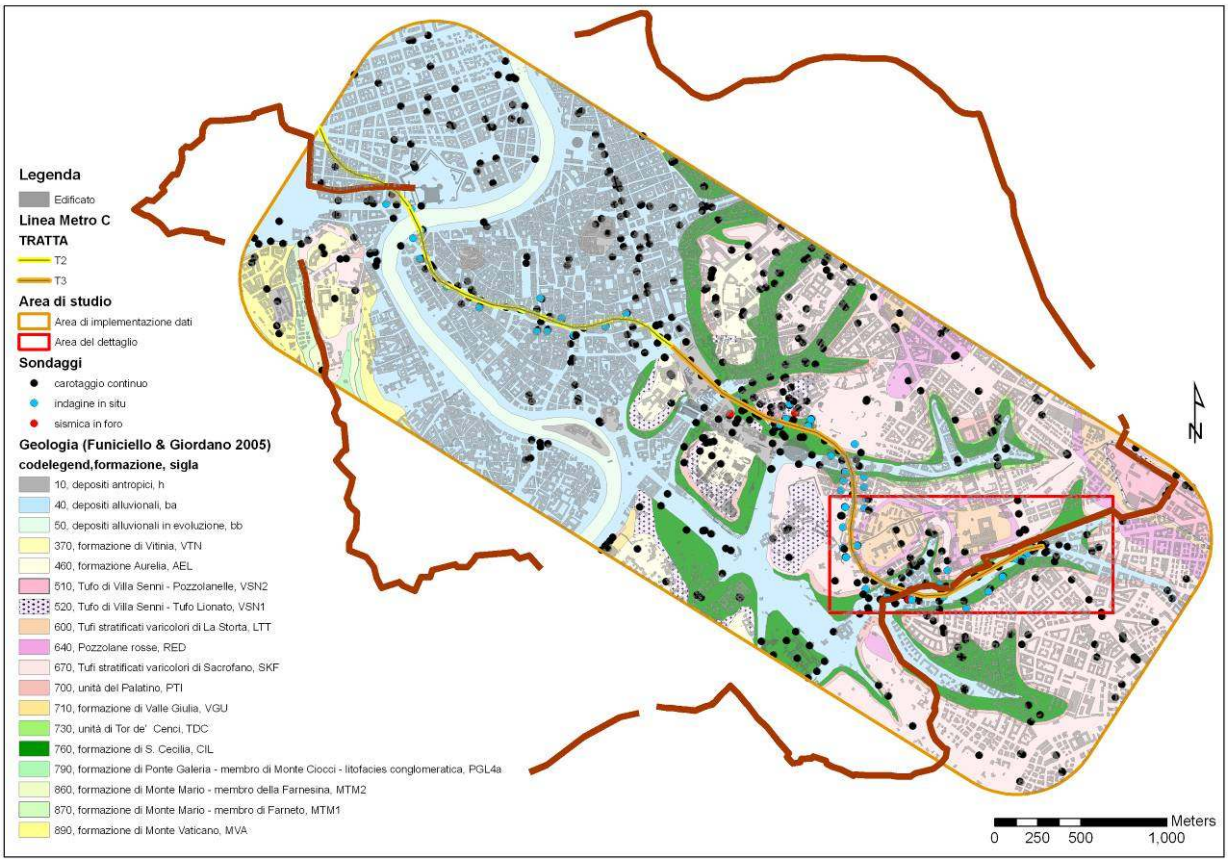


Figura 36 – Mappa dell'area di Roma scelta per la validazione del modello sviluppato per la valutazione della pericolosità geologica; i percorsi della metropolitana C di Roma, in via di esecuzione, pertinenti alle tratte T2 e T3, sono rappresentati in modo generico, indicandone la posizione in linea di massima delle gallerie, non considerando il doppio binario. L'area di dettaglio perimetrata in rosso è l'area di Porta Metronia.

Le informazioni del sottosuolo raccolte ed inserite sono prevalentemente dati puntuali provenienti da sondaggio o da indagini in foro, come illustrato nel Paragrafo 4.4.1.1. In particolare si è avuto accesso alle campagne geognostiche relative alla Tratta T2 (da Via della Conciliazione a Piazza Venezia) ed alla Tratta T3 (da piazza Venezia a San Giovanni) della nuova Metro C di Roma. Tali dati sono stati acquisiti in formato *pdf* per concessione della Metro C Spa e sono pertinenti alle campagne di indagine preliminare effettuate tra il 1995 e il 2001. Si tratta di 212 sondaggi tra geognostici e geotecnici spinti alla profondità massima di 67 metri e che presentano una distribuzione localizzata lungo

un'area di interesse di circa 500 m intorno all'ubicazione prevista dei binari, e quindi delle gallerie. Per permettere una ricostruzione stratigrafica più vincolata all'informazione geologica si sono incrementati i dati stratigrafici informatizzando i sondaggi bibliografici del Ventriglia 2002 ed inserendo quelli relativi al progetto *Forma Urbis* (1998), controllando soprattutto che non vi fosse ripetizione di dati identici (duplicazione dell'informazione). In totale i sondaggi raccolti ed inseriti nel *database* sono stati 605 di cui 534 sono sondaggi geognostici con stratigrafia, 62 sono indagini geotecniche in sito (prove penetrometriche statiche, dinamiche, prove pressiometriche e di permeabilità) e 9 sono indagini sismiche in foro (7 di tipo cross hole e 2 di tipo down hole). Sono stati inseriti inoltre le informazioni relative ai campioni prelevati e i risultati della loro caratterizzazione fisico-meccanica, il tipo di prove di laboratorio effettuate e quelle relative alle misure piezometriche. E' bene sottolineare che la distribuzione spaziale (X-Y-Z) delle informazioni raccolte non è omogenea né per qualità, né per dettaglio e quantità. L'informazione stratigrafica ha una distribuzione più uniforme sul territorio in esame dal punto di vista quantitativo, ma non nel dettaglio e nella qualità, viceversa l'informazione geologico-tecnica e geotecnica è meno estesa e meno densa, localizzandosi nell'area di interesse delle tratte della metropolitana C, ma è di qualità costante.
Per una maggiore agilità nella manipolazione dei dati, si sono inseriti le misure di SPT, CPT, misure di falda, risultati delle cross hole, in fogli di lavoro *excel* e sono stati acquisiti nella banca dati, previa formattazione coerente con la struttura della banca dati definita nel capitolo precedente, attraverso la funzionalità del sistema operativo *Windows* chiamata ODBC, ovvero *Open DataBase Connettivity*. In questo modo ArcMap™ è in grado di gestire i fogli di lavoro come delle semplici tabelle inserite nel *geodatabase*.

4.4.1.2 *Dati sulla geologia di superficie*

I dati sulla geologia di superficie sono stati acquisiti in formato shape file. Tali dati sono il risultato della digitalizzazione della nuova cartografia 1:1000 (Funiciello & Giordano 2005) del territorio di Roma all'interno del Grande Raccordo Anulare. I dati concessi dal Laboratorio Gis del Dip.to di Scienze Geologiche di Roma Tre, sono costituiti dai poligoni delle formazioni affioranti e gli attributi ad essi associati sono il nome della formazione, la sigla della formazione ed un *codelegend*. Lo *shape file* ha come sistema di riferimento il medesimo delle carte tecniche regionali, la base topografica su cui è stata

cartografata la geologia,ed è l'ED50-UTM33N. Allo stesso modo sono stati forniti i dati relativi alla tettonica.

4.4.1.3 *Dati topografici storici*

I dati storici sono stati ottenuti dalla cartografia storica, analizzati per lo studio della modificazione topografica del territorio e dell'evoluzione spazio-tempo dell'uso del suolo,. La digitalizzazione delle carte, dopo georeferenziazione delle stesse, è stato eseguito per la cartografia relativa al 1907-1924 (scala 1:5000) e al 1934 (scala 1:4000). La metodologia utilizzata per la georeferenziazione di tale cartografia è illustrata nel paragrafo seguente 4.4.2.1.

4.4.1.4 *Dati topografici attuali*

La topografia attuale è rappresentata dal modello digitale del terreno a 20 metri della Regione Lazio. Dati topografici puntuali sono stati acquisiti dalla banca dati spaziale Cartesia 1999, insieme alla ricostruzione delle curve di livello. Tali dati hanno permesso l'elaborazione di un dem a 5 metri. Ulteriori dati topografici, ma solo per l'area di Porta Metronia, sono stati forniti da Metro C Spa, in formato vettoriale *dwg* e sono punti quotati georeferenziati in sistema di riferimento locale. Per questi ultimi dati non vi è una struttura di dati associata, ma solo l'informazione altimetrica. Le tre tipologie di informazioni sono messe a confronto e commentate nella PARTE SECONDA, nell'ambito dell'applicazione sul caso di Porta Metronia (Paragrafo 9.1).

4.4.1.5 *Dati sulle cavità*

Per la distribuzione delle cavità nel sottosuolo si è georeferenziato il lavoro di Sciotti 1996 per la Protezione Civile del Comune di Roma e lo si è convertito da formato *dwg* (vettoriale cartesiano) a *shp* (vettoriale georeferenziato), ottenendo una mappa puntiforme delle principali cavità sotterranee della città: cave in sotterraneo, cunicoli idraulici, catacombe multilivello.
Inoltre, nell'ambito del pericolo crollo per cavità di origine antropica, si è integrato nel progetto la banca dati spaziale relativa al lavoro della Protezione civile (Corazza 2004) per le voragini. I punti corrispondenti alle voragini sono stati controllati per quanto riguarda

l'ubicazione e digitalizzati, collegandoli alle informazioni di maggiore incidenza ai fine della valutazione di tale pericolo presenti nella banca dati d'origine, modificandone in parte la struttura dei dati.

4.4.1.6 *Dati sull'urbanizzato*

I dati relativi all'edificato, ai manufatti archeologici ed alle strade derivano dalla banca dati spaziale Cartesia 1999. I dati vettoriali sono georeferiti rispetto al sistema di riferimento Roma 40 - Gauss Boaga Fuso Est. I dati acquisiti hanno mantenuto la struttura impostata nel *database* originario.

4.4.2 Il sistema di riferimento e la proiezione cartografica

Come è apparso evidente dall'illustrazione della tipologia dei dati acquisiti, il sistema di riferimento adottato non è affatto comune nei dati a disposizione. In un sistema informativo geografico la scelta del sistema di riferimento è un passo determinante perché definisce il minimo comune multiplo di tutti i dati spaziali che vi si andranno ad inserire e gestire, lo spazio geografico di proiezione dei dati. Questo comporta che una volta determinato il sistema di riferimento, tutti i dati vettoriali che si acquisiscono devono essere in quel sistema di riferimento o vi ci devono essere convertiti applicando appositi algoritmi.

Ad ogni sistema di riferimento è poi associata una proiezione cartografica che permette, note le coordinate geografiche, di calcolare le corrispondenti coordinate piane. In Italia si adottano principalmente tre diversi sistemi di riferimento, caratterizzati dalla definizione di un ellissoide di riferimento e del datum, con proiezioni cartografiche prestabilite, e sono così denominati:

1. ROMA 40 – GAUSS BOAGA (fuso Est, fuso Ovest);
2. ED50 – UTM32/33/34 (NS)
3. WGS84 (ETRS89) –UTM32/33/34 (NS)

Tali sistemi cartografici sono di seguito descritti:

1. ROMA40 è il sistema geodetico nazionale storico ancora in uso; esso adotta l'ellissoide di Hayford del 1924, i cui parametri sono: semiasse minore a=6378388 m ed uno schiacciamento f=1/297. L'orientamento dell'ellissoide è sulla verticale di Monte

Mario, posizionato per definizione astronomica del 1940 alla longitudine zero (pari a 12° 27' 08.4'' Est di *Greenwich*) e latitudine pari a 41° 55' 25.51''. Al sistema ROMA40 è associato il sistema cartografico Gauss Boaga che utilizza la rappresentazione conforme di Gauss adattandola al territorio nazionale tramite due fusi di 6°, Ovest ed Est. In tale sistema è stata realizzata la cartografia storica nazionale e gran parte della Carta Tecnica Regionale in formato numerico alle scale 1:5000 e 1:10000.

2. ED50, ossia l' *European Datum* 1950, è il sistema europeo adottato nel 1950 anche in Italia, utilizza lo stesso ellissoide di Roma40, ma con orientamento medio europeo a Potsdam. In questo sistema il meridiano di Monte Mario assume le coordinate geografiche pari ad una latitudine di 41° 55' 31.487''ed una longitudine di 12° 27' 10.93''. Al sistema ED50 è associato il sistema cartografico UTM progettato per cartografare tutta la Terra tramite la rappresentazione conforme di Gauss. Il sistema UTM considera quindi 60 fusi di 6à numerati da Ovest verso Est a partire dall'antimeridiano di *Greenwich*. L'Italia ricade nei fusi 32, 33 e 34, i cui meridiani centrali hanno rispettivamente una longitudine di 9°, 15° e 21° rispetto al meridiano di *Greenwich*.
3. WGS84, ossia il *World Geodetic System* 1984, è il sistema di riferimento mondiale geocentrico introdotto recentemente in Italia in seguito all'affermarsi delle tecniche di rilievo GPS. La realizzazione europea di tale sistema prende il nome di ETRS80 al quale è associato l'ellissoide, sempre geocentrico, GRS80. Tale ellissoide (*Geodetic Reference System* 1980) è caratterizzato da uno schiacciamento f=1/298257222101 e semiasse minore a=6378137 m. Il sistema cartografico associato è l'UTM con le stesse caratteristiche definito nel punto 2. Al sistema WGS84 è stato inoltre associato il "Fuso Italia", sistema cartografico di recente introduzione, con lo scopo di proiettare tutta l'Italia su un unico piano cartografico senza soluzioni di continuità. Tale sistema, studiato per ridurre le deformazioni su ampie zone, risulta particolarmente adatto per la georeferenziazione di sistemi informativi che riguardano l'intero territorio nazionale.

Quanto descritto finora è valido per la rappresentazione planimetrica, ma per quella altimetrica i sistemi Roma40 e ED50 adottano le quote geoidiche, riferite cioè al livello del mare. Per l'Italia continentale il riferimento altimetrico è il mareografo di Genova, per la Sicilia e la Sardegna rispettivamente i mareografi di Catania e di Cagliari. Il WGS84, invece, adotta come quote altimetriche, le quote ellissoidiche riferite all'ellissoide di riferimento GRS80.

Nei dati vettoriali acquisiti appartengono prevalentemente ai sistemi ROMA40 o ED50, in particolare il primo è il sistema adottato dalla banca dati cartografica Cartesia che ha un errore nominale planimetrico dell'ordine dei cm ed altimetrico di 0.6 m. L'ED50 è invece adottato per la rappresentazione delle formazioni geologiche, dove l'errore planimetrico ammissibile e dell'ordine del metro, in quanto i limiti geologici, essendo spesso estrapolati, non necessitano della precisione dei dati topografici. Si è quindi optato di scegliere il sistema di riferimento dei dati che garantivano una maggiore precisione e che un eventuale conversione di coordinate avrebbe potuto inficiare con un errore aggiuntivo. Nel sistema informativo progettato si è deciso perciò di adottare il sistema di riferimento nazionale ROMA 40 – GAUSS BOAGA, Fuso Est e convertire i dati ED50 – UTM33N.

4.4.2.1 *Problemi di georeferenziazione*

Nell'acquisizione di una parte dei dati sia vettoriali sia in formato raster è stato necessario o georeferenziarli in quanto privi di un sistema di riferimento (1), oppure convertirli in ROMA40 qualora fossero stati in ED50 (2).

(1) I dati *raster* che si sono georeferenziati sono le carte storiche e si è proceduto secondo la metodologia illustrata nei lavori di Keti Lelo (2000) e Funiciello *et alii* (2008).

Il confronto di cartografie storiche è utile alla ricostruzione degli interventi antropici legati a spostamenti di terra e modifiche di pendii, in particolare di carte topografiche alla scala di dettaglio, con quelle recenti. Il sistema informativo progettato prevede la possibilità di acquisire informazioni storiche, digitalizzando le isoipse e punti quotati, gli elementi idrografici ed uso del suolo. Prima di poter passare alla digitalizzazione, le cartografie in formato raster devono essere georeferenziate secondo il sistema di riferimento definito nel progetto (nel caso specifico Roma 40-Gauss-Boaga, vedi il sottoparagrafo 4.4.2). La georeferenziazione di carte storiche avviene secondo la metodologia "*image to image",* ossia rintracciando una griglia, il più uniforme possibile, di punti omologhi su l'immagine da georeferire (X,Y) e sull'immagine di riferimento (longitudine e latitudine). Tale tecnica presenta diverse difficoltà relative a problemi di deformazione ed all'entità dell'errore ammissibile per avere un risultato accettabile al fine proposto. In primis trovare i punti omologhi tra l'edificato attuale e quello passato non è sempre scontato. Bisogna rintracciare edifici noti, spesso edifici storici e monumenti,

quindi in aree scarsamente edificate l'individuazione dei punti idonei è difficoltosa. In un'area come Porta Metronia per esempio, intensamente costruita a partire dagli anni '30, l'individuazione di punti certi è disomogenea. Si è ovviato a tale problema, georeferenziando un'area maggiore che permettesse di avere punti sufficienti e distribuisse in modo meno localizzato la deformazione dovuta alla carenza di punti nell'area meno edificata. Per la cartografia relativa al 1907-24 ed al 1934, le tavole scansionate in formato *jpeg* sono state moisacate ed unite per non avere soluzioni di continuità, attraverso un programma di grafica. Solo dopo si sono georeferenziate attraverso una griglia di oltre 50 punti ed applicando una trasformazione di tipo *spline*. L'algoritmo applicato non permette di valutare la distribuzione della deformazione che risulta disomogeneo sulla mappa.

Altre difficoltà non evitabili sono dovute alla diversa rappresentazione cartografica nel simbolismo adottato, nel grado di dettaglio relativo alla scala e nella risoluzione del *raster* (Fig. 37). Questo provoca una incertezza nell'individuazione del punto ed il suo riconoscimento univoco nella mappa da georeferenziare.

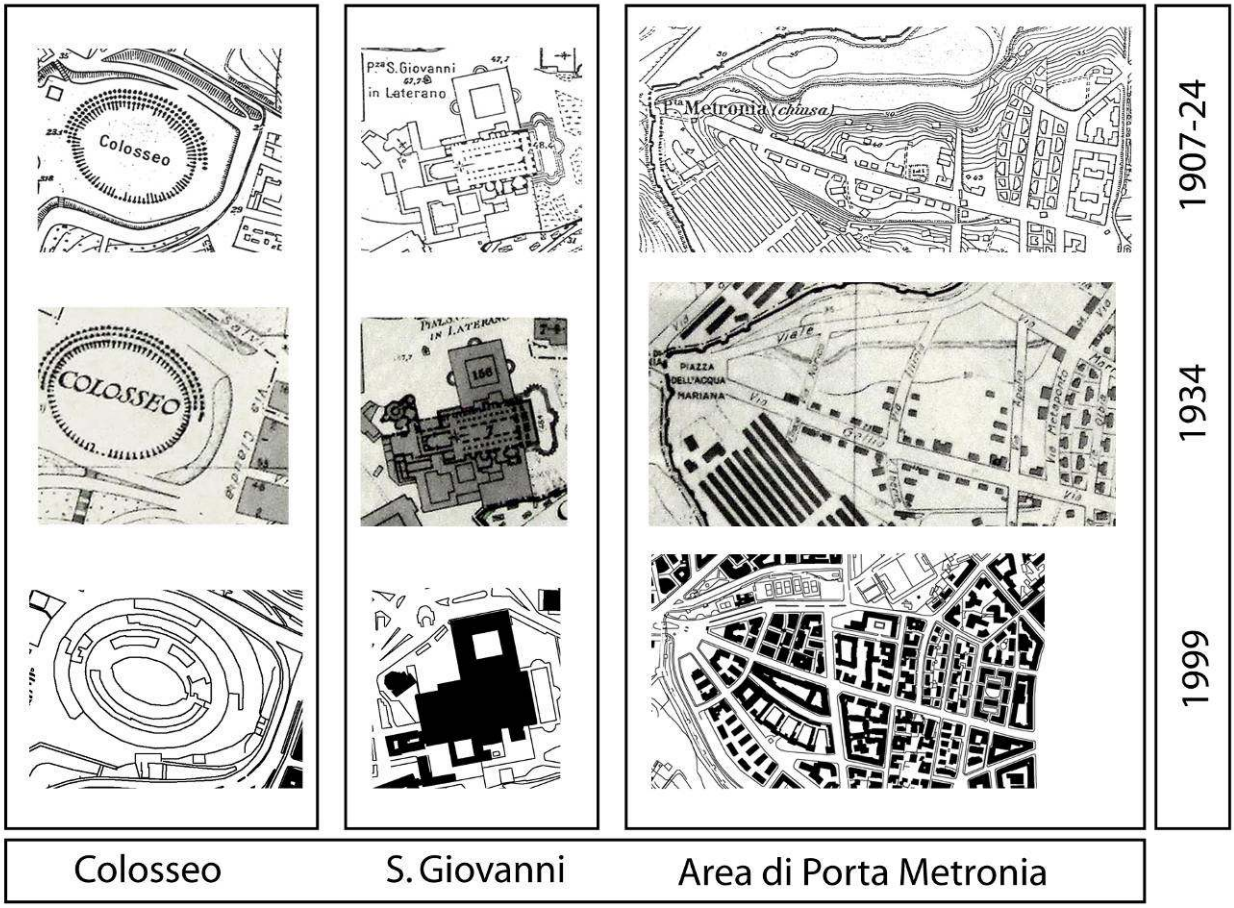


Figura 37 – Confronto tra le diverse cartografie storiche prese in considerazione e georeferenziate; la cartografia del 1999, relativa alla trasformazione raster del banca dati vettoriale Cartesia, costituisce la cartografia georeferenziata in ROMA40 – GAUSS BOAGA (Fuso est) rispetto alla quale si effettua la georeferenziazione della cartografia storica e dei vettoriali non georeferenziati. Nel confronto dei diversi manufatti considerati (Colosseo, Basilica di San Giovanni in Laterano e l'area esterna alle mura presso Porta metronia) risulta evidente la diversa rappresentazione grafica e il diverso spessore del tratto. Inoltre nell'area di Porta Metronia risulta difficile l'individuazione certa sulle diverse cartografie di edifici identici, dovuto alle modificazioni urbanistiche del territorio.

Ulteriori deformazioni non calcolabili sono dovute alla scansione delle tavole nei scanner plotter ed agli aggiustamenti effettuati durante la loro unione con il programma di grafica.
In definitiva la georeferenziazione effettuata presenta un errore planimetrico del metro, non omogeneamente distribuito, associato ad una deformazione non quantificabile, ma del tutto accettabile con il grado di accuratezza e precisione relativo agli obiettivi proposti e si è ritenuto non opportuno nell'ambito di questa tesi cercare di ridurre tale errore e deformazione per lo sfavorevole rapporto tempo-qualità.
(2) Per quanto riguarda la conversione dal sistema Roma40 a quello ED50, si è calcolato la differenza di latitudine e longitudine media tra l'estremità NO e l'estremità SE dell'estensione massima dei dati rappresentati rispetto ai due sistemi di riferimento. Individuato un punto noto nell'estremità NO ed uno in quella SE, nella cartografia Cartesia in ROMA40 si sono ottenute le coordinate piane in metri e le si sono convertite nel sistema ED50-UTM33 attraverso il software dell'Istituto Geografico Militare "Verto 3", appositamente creato per effettuare le conversioni tra i tre diversi sistemi geodetici e cartografici diffusi in Italia in tutte le possibili combinazioni, compresa la conversione della componente altimetrica. Verto 3 contiene gli algoritmi necessari ad eseguire le trasformazioni ed attraverso il grigliato dei vertici trigonometrici IGM95, relativi alla rete geodetica nazionale di primo livello, noto un punto in un sistema ne calcola le coordinate geografiche o piane nell'altro. Nella trasformazione da ED50-UTM33N a ROMA40 – GAUSS BOAGA (Fuso est) si è calcolato che è necessario aggiungere 2019936.28 metri al valore della longitudine in ED50 e sottrarre 182.791 metri al valore della latitudine per ottenere i corrispondenti valori in coordinate piane ROMA40.

La georeferenziazione e la conversione dei dati rispetto ai punti (1) e (2) sono state eseguite in ArcMap™ grazie allo specifico tool "*Georeferencing*"

PARTE SECONDA

5. APPLICAZIONI

La città di Roma si è sviluppata in un ambiente naturale favorevole, ma lo sviluppo urbano e le esigenze della popolazione insediata hanno interagito non sempre in modo positivo con esso. Nel territorio del comune di Roma insistono, come visto nel Capitolo 2.3, molteplici fattori di pericolosità geologica peculiari di un ambiente fortemente urbanizzato: una imponente coltre di terreni di riporto, reti caveali sotterranee diffuse e non sempre ben conosciute,, aree subsidenti per il carico applicato nell'ambito delle alluvioni recenti, inoltre suscettibili a fenomeni di amplificazione sismica, modificazioni morfologiche ed idrogeologiche con perdita di sicurezza dei versanti, solo per esemplificarne alcune. Tali fattori di pericolosità insieme con la vulnerabilità e al valore esposto dei beni archeologici e dei manufatti che costituiscono il patrimonio storico e monumentale non solo della città, ma dell'Italia e del mondo, determinano un rischio potenziale non trascurabile. Ricordiamo infatti che il Centro Storico di Roma è inserito nella lista dei patrimoni dell'umanità dell'UNESCO.

Il territorio di Roma è stato studiato, dal punto di vista geologico fin dall'ottocento (Brocchi 1820, Tellini 1893, Verri 1915, Ventriglia 1971, 1999, 2002, Giordano *et alii* 2004, Funiciello *et alii*, 1995, 2008) e in diversi studi si sono affrontate le sue pericolosità geologiche (De Angelis D'Ossat 1905, 1915, 1937, 1942, 1943, Sciotti 1986, 1996, Amanti *et alii* 1995, 2008, Corazza *et alii* 2002, Campolunghi *et alii* 2006). Gli studi geologici più recenti sono sintetizzati, per tutto il territorio di Roma, nella nuova cartografia geologica, la "Carta Geologica Foglio 374 Roma, 1:50,000 (Funiciello & Giordano 2008), redatta a partire dai rilevamenti della "Carta Geologica di Roma alla scala 1: 10,000" (Funiciello & Giordano 2005). La città attualmente è dotata anche di una nuova cartografia gravimetrica, la "Carta Gravimetrica d'Italia alla scala 1:50000 Foglio 374 Roma (Cesi *et alii* 2008) che descrive le geometrie e gli andamenti delle strutture geologiche nel sottosuolo, in particolare di quelle profonde.

Inoltre la città sta ospitando i lavori per la costruzione della terza linea metropolitana di Roma, la Metro C e numerosi cantieri che danno la possibilità di acquisire nuove informazioni sulle caratteristiche geologico-stratigrafiche-geotecniche del sottosuolo romano.

. Le caratteristiche intrinseche del suo territorio urbano, la disponibilità di documenti cartografici storici che ne hanno registrato l'evoluzione urbanistica e l'enorme quantità di

dati sul sottosuolo esistenti ed in acquisizione costante, fanno di Roma un laboratorio originale e straordinario per valutare in prima analisi, con dei casi circoscritti e significativi, l'operatività della banca dati territoriale proposta in questa Tesi come risorsa di base per le procedure di valutazione di pericolosità, e verificare la validità del percorso metodologico intrapreso, la sua efficacia nell'applicazione specifica.

Dal punto di vista della pericolosità geologica, le aree dove l'uomo ha modificato maggiormente il delicato equilibrio naturale sono le zone di piana alluvionale. I depositi alluvionali del Tevere e del suo reticolo idrografico costituiscono, dopo i terreni di riporto, l'unità geologicamente più recente (Olocene), legata alla fase di risalita del livello del mare, che colmarono il reticolo wurmiano (ultimo glaciale). L'urbanizzazione con le continue bonifiche che dal tempo dei Romani si sono succedute per la creazione di condizioni idonee all'edificazione, ha obliterato per la maggior parte questo reticolo con una spessa coltre di materiale di riporto, che spesso rende difficile riconoscerne l'esistenza. Attraverso la cartografia storica, notizie e racconti, ma soprattutto attraverso la ricostruzione dei depositi alluvionale, il reticolo urbano traspare nella sua totalità. Per questa loro attuale non evidenza, vengono definiti paleofossi, anche perché laddove scorrevano, ora vi sono reti di drenaggio antropiche e fognature.

Tra gli affluenti del Tevere si ricorda che il maggiore è l'Aniene, che scorre in direzione E-O e si immette nel corso principale all'altezza del Ponte Salario, zona Prati Fiscali; insieme con la valle del Velabro (Velabro Maius nel quale confluiscono il Velabro Minore, il Fosso Labicano e il Fosso delle Acque Mariane), il Fosso della Caffarella, di Grotta Perfetta, delle Tre Fontane, della Cecchignola, dell'Acquacetosa e di Valleranno, costituiscono gli affluenti della sinistra idrografica del Tevere. In destra idrografica, a partire da N verso S, si trovano la Valle dell'Inferno, il Fosso del Gelsomino, del Tiradiavoli, di Papa Leone, dell'Affogalasino e della Maglianella che confluisce nel Fosso della Magliana.

I depositi alluvionali dei tributari in riva destra e sinistra presentano caratteri geologico-stratigrafici molto diversi che comportano delle diverse caratteristiche geotecniche in quanto sono il frutto di processi erosivi su litotipi dissimili.

In riva sinistra le litofacies argilloso limose sono legate all'erosione del materiale vulcanico (piroclastici, tufi, cineriti ecc) delle unità dei Colli Albani e sabatine, nonché del materiale vulcanico rimaneggiato dai lahar che costituiscono la piana di Ciampino (formazione del Tavolato); inoltre la presenza di materia organica diffusa e livelli torbosi per spessori dell'ordine dei metri è costante in prossimità della confluenza con il Tevere.

In riva destra si ha la deposizione di ghiaie,sabbie, limi, argille e termini granulometrica intermedi, il cui bacino di alimentazione principale è costituito dalle formazioni marine e continentali di transizione di età plio-pleistocenica, affioranti nell'alto strutturale di Monte Mario e solo subordinatamente dai depositi vulcanici primari delle unità sabatine.
In Campolunghi *et alii* (2004) propongono una carta di zonizzazione della pericolosità associata alla presenza dei depositi alluvionali del reticolo idrografico tiberino (Fig. 38). Gli autori individuano delle aree di pericolosità relativa.
I depositi alluvionali dei tributari di sinistra, per l'abbondante presenza di materia organica e per la scarsa consolidazione costituiscono le aree in cui la propensione a fenomeni di subsidenza geotecnica è maggiore.
Nelle alluvioni tiberine, la materia organica è presente in livelli sottili che creano delle instabilità, ma minore rispetto ai tributari di sinistra. Si evidenzia inoltre come i depositi soggetti ai carichi litostatici dei riporti e degli edifici per diverse migliaia di anni, come nel Centro Storico, abbiano favorito delle condizioni di stabilità relativa dei depositi, evidenza confermata dai dati interferometrici InSAR (dati ESA-Campagna 1991-2000, Prof. Rocca, Politecnico di Milano; Desiderati 2005, Campolunghi *et alii* 2008).
I tributari in riva destra mostrano una discreta propensione alla subsidenza solo in prossimità del segmento fluviale che confluisce nel Tevere, ma sono sostanzialmente stabili e, rispetto ai fossi di sinistra, non suscettibili alla pericolosità investigata.
Vi è inoltre da sottolineare che i depositi alluvionali sono propensi a fenomeni di amplificazione dello scuotimento (Fah *et alii* 1993, 1995, Rovelli *et alii* 1994), condizionando di molto la risposta sismica locale. Le valli dei tributari sono strette e lunghe ed è stato evidenziato che confrontando il valore del rapporto di forma del bacino (*shape ratio* ossia profondità/lunghezza della sezione), si è notata una localizzazione degli effetti di maggiore intensità in corrispondenza delle valli di minore larghezza (Cifelli *et alii* 1999a, b, 2000, Donati *et alii* 2008). Numerosi studi su tale tematica sono stati sviluppati a riguardo ed alcuni sinteticamente illustrati nel Paragrafo 2.3.3.1.

Alla luce delle considerazioni precedentemente illustrate, sono stati presi in considerazione in questa Tesi i casi di:

1. Fosso delle Acque Mariane (Porta Metronia), centro storico, riva sinistra;
2. Fosso di Grotta Perfetta (Giustiniano Imperatore) urbanizzazione recente, riva sinistra.

Si è voluto confrontare due tributari di riva sinistra che presentano una diversa storia urbanistica e che sono esempi strategici per investigare il comportamento geotecnico dei depositi alluvionali in condizioni statiche e dinamiche.

Questo lavoro di Dottorato ha beneficiato dell'acquisizione dati relativa alla campagna di indagini geognostiche preliminari per la costruzione della nuova linea metropolitana, dal momento che Metro C Spa ha gentilmente concesso l'integrazione di tali informazioni nel progetto qui presentato, per quanto concerne parte della tratta T2, a partire da Castel Sant'Angelo ed attraverso via dei Fori Imperiali fino a Piazza Venezia, e la tratta T3, da Piazza Venezia a San Giovanni. La disponibilità di Metro C Spa è stata fondamentale perché ha permesso di acquisire nella banca dati le informazioni geotecniche di qualità ed alta affidabilità (prova di taglio diretto, cella triassiale, prova edometrica, ELL, prove di colonna risonante, ecc), corredate dalla certificazione di laboratorio, ed altrettanto per le prove geotecniche in situ sia standard (CPTE, CPTU, SPT, DPSH, Le Franc, Menard) sia di sismica in foro (*cross hole, down hole*).

Tali dati sono stati utili ai fini della caratterizzazione geotecnica in condizioni statiche e dinamiche dei depositi dell'area di Porta Metronia dove la progettazione della metropolitana Linea C con la stazione in via dell'Amba Aradam, ha determinato la necessità di un approfondimento di indagine del sottosuolo con conseguente incremento di prove di laboratorio ed in situ. L'acquisizione in banca dati di tali dati ha permesso di caratterizzare dal punto di vista dinamico la paleovalle del fosso delle Acque Mariane e di definirne la geometria, gli spessori dei sedimenti olocenici e l'andamento del tetto delle argille plioceniche costituenti il *bedrock* sismico.

Nell'area di via Giustiniano Imperatore la subsidenza geotecnica relativa al consolidamento dei terreni alluvionali di fondazione ha determinato una situazione d'emergenza tale da demolire e ricostruire alcuni edifici. Il Comune di Roma ha affidato all'ISPRA e al Dipartimento di Scienza Geologiche dell'Università di Roma Tre il monitoraggio continuo dell'area. Questo ha comportato uno studio approfondito e dettagliato in condizioni statiche, che in questa tesi è stato integrato definendo l'aspetto dinamico dei terreni di fondazione, effettuando una prova *cross hole*. Le indagine sismiche in sito ed in laboratorio sono complementari, consentendo di definire i parametri di rigidezza, modulo di deformazione, modulo di taglio e smorzamento, dati propedeutici all'analisi numerica per lo studio della risposta sismica locale e nel *geodatabase* vengono

entrambe presi in considerazione (tabelle **Vps**, **V** per le prove in sito e **SpL** per le prove di laboratorio).

Per l'interpretazione geologico-stratigrafica è stata fondamentale base di partenza la nuova cartografia di Roma, citata all'inizio del paragrafo. Le unità stratigrafiche riconosciute in sondaggio sono state attribuite ad unità litostratigrafiche organizzate in termini di unità a limiti inconformi (UBSU) come proposto nella cartografia, rendendo conto dell'estrema variabilità laterale e verticale di litofacies presenti all'interno delle singole unità riconosciute. Lavorando alla scala del sondaggio, è stato fondamentale il riconoscimento dei terreni di riporto, sotto i quali si trovano le formazioni originarie.

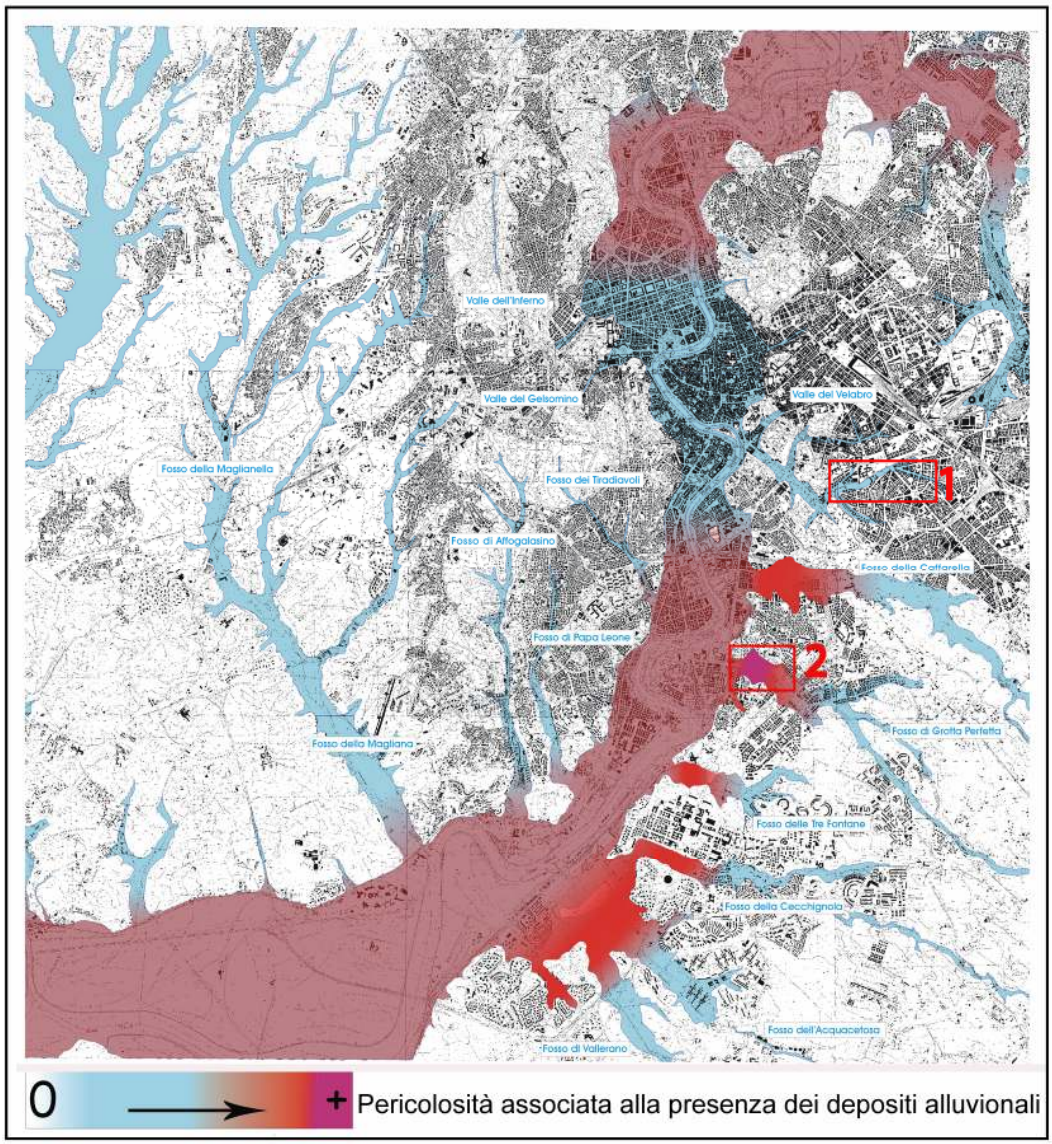


Figura 38: Carta della zonizzazione della pericolosità associata ai depositi alluvionali; sono indicate le valli dei fossi di riva sinistra e destra del fiume Tevere. Con un rettangolo rosso e contrassegnate dalla numerazione sono indicate le aree oggetto dello studio: 1. Fosso delle Acque Mariane; 2. Fosso di Grotta Perfetta.(da Campolunghi *et alii* 2004)

Si sono effettuate infine analisi in ambiente GIS, dopo il calcolo di un modello digitale del sottosuolo e l'interpretazione geologico-stratigrafica dei dati di sondaggio, e quindi la manipolazione dei dati elementari per ottenere le informazioni necessarie a ricostruire le principali superfici geologiche con la loro geometria. Integrando i dati di sondaggio con sezioni geologiche così da rendere le superfici il più possibile vincolate alla realtà geologica e non solo al metodo di estrapolazione statistico o deterministico usato, si sono ottenute le seguenti superfici stratigrafiche:

a. Letto dei riporti

c. Tetto e letto delle alluvioni oloceniche del paleofosso,

d. Tetto e letto dell'unità pleistocenica con particolare attenzione allo strato basale ghiaioso,

e. Tetto della formazione pliocenica di Monte Vaticano.

Si sono inoltre calcolati tramite operazione sulle superfici raster, gli spessori dei terreni di riporto, dei cicli sedimentari pleistocenici e delle alluvioni oloceniche.

5.1 PERICOLOSITÀ GEOTECNICA SISMICA E MICROZONAZIONE

La pericolosità geotecnica sismica è pertinente al comportamento del terreno in condizioni di sollecitazione di tipo dinamico. Il fenomeno di vibrazione prodotto da un evento sismico

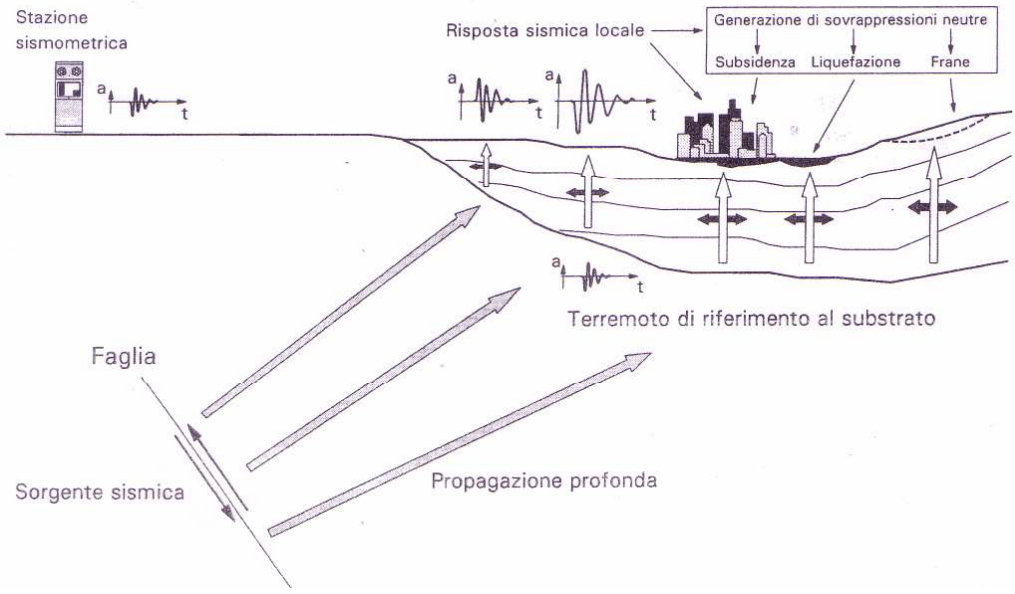


Figura 39: Schematizzazione della propagazione di un evento sismico dalla sorgente al sito e problemi geotecnici, non in scala (da Lanzo & Silvestri 1999)

in un sito (Fig. 39) è il risultato della propagazione a distanza dalla sorgente di onde elastiche di volume, che in profondità attraversano ammassi di roccia lapidea ed in superficie in genere interessano formazioni di terreni sciolti.

L'influenza esercitata dalle condizioni geotecniche locali sui danni alle costruzioni è stata riconosciuta in ambito internazionale, come evidenzia il manuale di zonazione "*Manual of Zonation on Seismic Geotechnical Hazards*"(TC4, 1999) edito dalla *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.

La gran parte di questi fenomeni è fortemente condizionata dalle caratteristiche geometriche e meccaniche della porzione più superficiale di sottosuolo, in particolare di quella coltre di terreni che si estende dal piano di campagna fino ad una profondità di poche decine di metri.

La pericolosità geotecnica sismica si esplica sia come problemi di amplificazione delle onde sismiche, sia nell'innesco di fenomeni di instabilità dei pendii e di liquefazione, e riguarda gli studi di risposta sismica locale. La valutazione di tale risposta è intrinsecamente connessa alla valutazione della pericolosità sismica di cui è un aspetto fondamentale. Per *pericolosità sismica* si deve intendere perciò la combinazione tra il "*moto sismico al bedrock*" (moto sismico di riferimento in un generico sito) e gli effetti locali che danno luogo alla cosiddetta "*risposta sismica locale*" dipendente, come già detto, dai caratteri locali del sito (i.e. caratteristiche geologiche, geofisiche e geotecniche oltre che caratteri morfologici del sito).

Uno studio di pericolosità sismica si articola in diverse componenti essenziali di tipo multidisciplinare (geologia, geofisica, geotecnica, ingegneria strutturale, ecc) che si integrano e contribuiscono alla definizione di diverse carte tematiche e di sintesi (Fig. 40).

La valutazione della pericolosità sismica a scala locale non può prescindere infatti da studi di tipo geologico, geofisico e geotecnico finalizzati alla valutazione dei fenomeni di amplificazione del moto sismico, alla valutazione della suscettibilità alla liquefazione, al potenziale innesco di frane. Gli studi così effettuati conducono alla cosiddetta "zonazione", cioè alla suddivisione del territorio in aree omogenee riguardo alla risposta sismica ed alle conseguenze dirette o indirette derivanti dall'evento sismico.

La *pericolosità sismica di base* ovvero la *scuotibilità* calcola (generalmente in maniera probabilistica), per una certa regione, in un determinato periodo di tempo, il valore atteso di uno dei parametri che descrivono il terremoto di riferimento al *bedrock* (velocità o/e accelerazione del moto del suolo, intensità al sito, spettro di sito). La scala di studio è solitamente regionale. La pericolosità sismica locale ovvero la risposta sismica locale si

basa su studi di pericolosità a scala di dettaglio che partendo dai risultati degli studi di pericolosità sismica di base ed analizzando i caratteri geologici, geofisici e geotecnici del sito definiscono la risposta sismica locale.

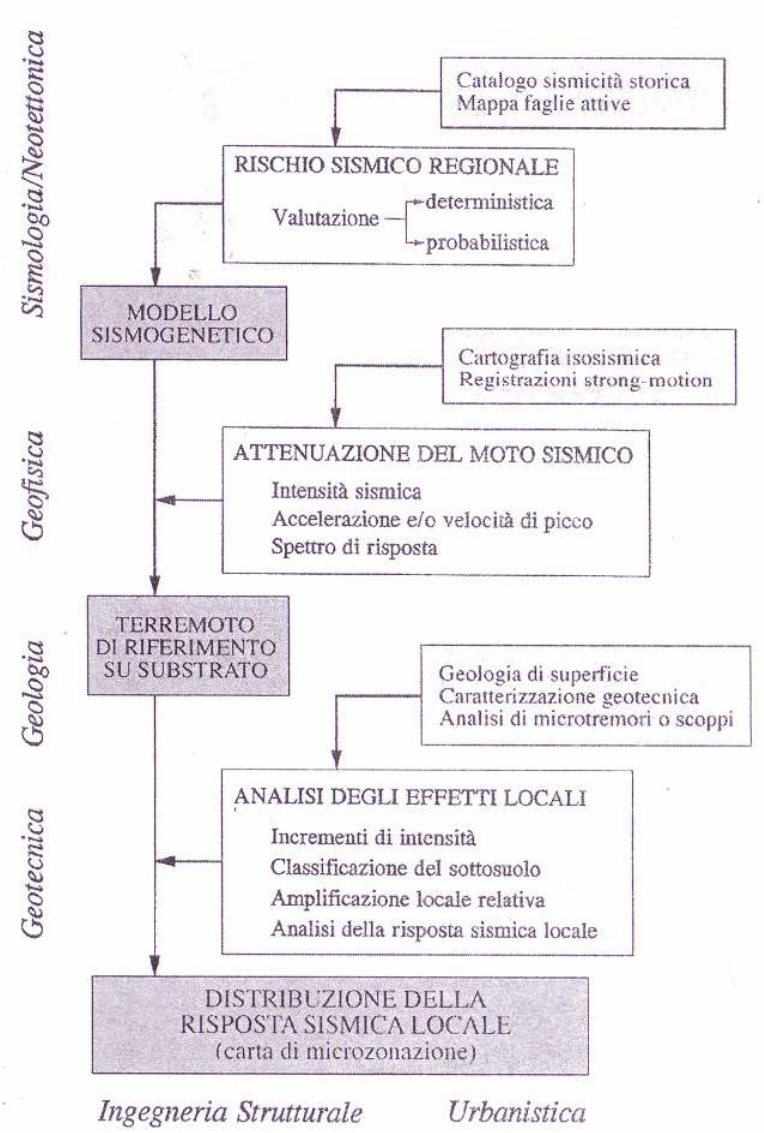


Figura 40: Diagramma di flusso per uno studio di microzonazione adattato dal TC4 (da Silvestri & Lanzo 1999).

Per quanto riguarda la microzonazione sismica si illustrano sinteticamente le metodologie e le procedure d'analisi ampiamente consolidate e condivise nell'ambiente tecnico e professionale. Tra i fenomeni che possono colpire l'ambiente fisico, esistono procedure di analisi standardizzata per i fenomeni di instabilità dei pendii e di liquefazione, mentre quelle relative alle analisi degli altri fenomeni fisici connessi a sismi (i.e. tsunami; fratture in superficie e subsidenza) non hanno lo stesso grado di maturazione e condivisione dei precedenti.

Uno studio di microzonazione sismica può essere condotto con approcci più o meno sofisticati, ma comunque sempre adeguati al livello di approfondimento delle conoscenze del territorio in studio. La microzonazione va intesa come uno strumento di supporto alle decisioni per chi può e deve pianificare l'uso del territorio e per quanti sovrintendono e programmano le misure di prevenzione, gli interventi di emergenza, le azioni di recupero e ricostruzione. In tale ottica, la microzonazione si configura anche come uno strumento di riduzione del rischio sismico. Le procedure di microzonazione dovrebbero essere periodicamente adeguate al progredire delle conoscenze scientifiche ed all'evoluzione delle tecnologie. In alcuni casi, potrebbe essere anche opportuno aggiornare i risultati di studi esistenti di microzonazione sismica per adeguarli alle nuove conoscenze ed alle evidenze sperimentali raccolte successivamente.

Si individuano in genere tre livelli di zonazione, cui sono associati metodi d'analisi via via più complessi, che, a loro volta, richiedono un crescente grado di conoscenza dei caratteri geologici, geofisici e geotecnici dell'area (i.e. morfologia superficiale e sepolta, regime delle acque sotterranee, costituzione del sottosuolo, proprietà fisico-meccaniche dei terreni e delle rocce presenti).

Il livello 1 ha per obiettivo l'individuazione delle microzone a comportamento sismico omogeneo su carte a scala 1:5000- 1:10000. Il livello 1 costituisce uno studio qualitativo propedeutico ed obbligatorio per affrontare i successivi livelli di approfondimento. I risultati di questo livello possono orientare la scelta del livello successivo di approfondimento. In questa fase si analizzano i dati a disposizione pregressi (cartografia geologica, geomorfologia, zone di faglia attive ed aree sismogenetiche, sondaggi, prove geotecniche, ecc) e si sintetizza il quadro delle conoscenze generali sull'area di studio. Non è previsto in questa fase l'uso di un input sismico, né la quantificazione numerica dei diversi effetti.

Il livello 2, successivo al livello 1, si pone l'obiettivo da una parte di integrare e completare il quadro delle conoscenze e soprattutto dei dati utili, dall'altra di quantificare in modo semplificato, attraverso abachi e leggi empiriche, la modificazione locale del moto sismico in superficie e dei fenomeni di deformazione permanente. Come risultato di questo livello si produce una carta di microzonazione sismica, ottenuta dalla revisione del modello geologico-geotecnico associato a valori ottenuti da abachi dei fattori di amplificazione locale.

Il livello finale di approfondimento o livello 3 si basa su quanto ottenuto nei livelli 1 e 2, fornendo una quantificazione degli effetti di un sisma di riferimento attraverso

l'applicazione di specifici codici di calcolo 1D, 2D. Per poter procedere in questo livello di approfondimento bisogna definire:

- Modello geologico (stratigrafia e geometria dei depositi);
- Modello geotecnico (proprietà statiche e dinamiche dei terreni);
- Accellerogramma del moto sismico di riferimento.

Nella caratterizzazione dinamica dei terreni sono fondamentali i dati ottenuti da prove in sito standard quali SPT e CPT, per la determinazione empirica di v_s,quindi della rigidezza (G), e geofisiche in foro quali *cross hole*, *down hole*, ecc. per i profili di velocità delle onde S e dei parametri di deformabilità (vedi APPENDICE II); dati da prove di laboratorio cicliche (prove di taglio semplice ciclico, prova triassiale ciclica, ecc) e dinamiche (prova di colonna risonante, *bender elements*) per ottenere l'andamento della rigidezza (curva G-γ), e del fattore di smorzamento (curva D-γ) con la deformazione.

All'inizio del 2006 la Protezione Civile ha proposto l'istituzione di un gruppo di lavoro per definire degli "Indirizzi e criteri generali per la microzonazione sismica", operato che rientra a pieno titolo nei piani nazionali di prevenzione e previsione previsti dall'art. 4 della legge 24 Febbraio 1992, n.225. Il lavoro ha visto e vede tuttora una complessa interazione di vari settori disciplinari che contribuiscono in maniera sinergica al risultato finale.

6. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'assetto odierno dell'area romana è stato determinato dall'articolata e complessa evoluzione geologica relativa agli ultimi 20-25 Ma del margine tirrenico. Il contesto geodinamico in cui si inserisce il territorio della città di Roma è legato alla strutturazione della catena appenninica, riconducibile al processo di convergenza tra la Placca Europea e la Placca Africana ed al collasso dell'orogene stesso, responsabile del progressivo processo di estensione verso ovest e dell'assottigliamento crostale che ha permesso lo sviluppo di un intenso vulcanismo di retro-arco (Faccenna *et alii* 1997, Mattei *et alii*, 2008) (Fig. 41).

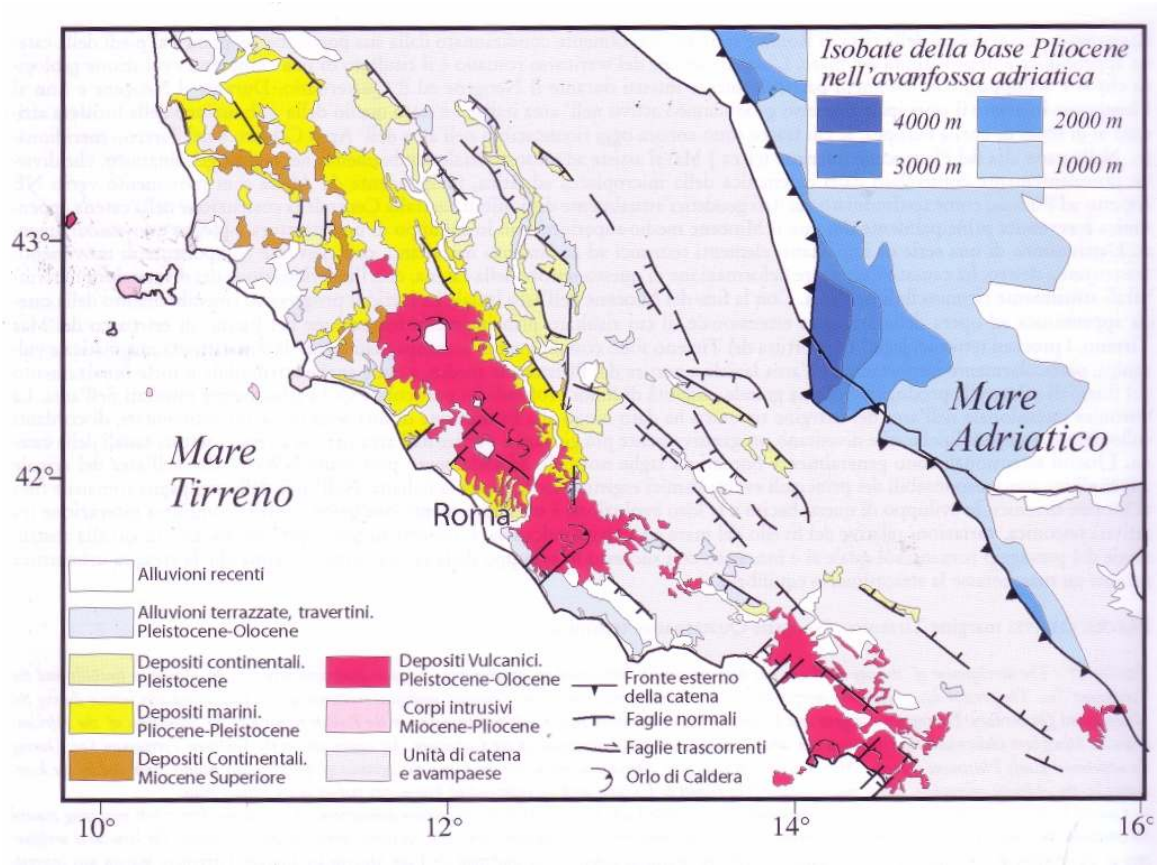


Figura 41: Carta strutturale di sintesi del margine tirrenico (da Mattei *et alii* 2008)

La successione pre- e sin-orogenica costituisce la struttura profonda dell'area ed è stata ricostruita a partire dalle indagini geofisiche, da alcuni sondaggi profondi e dallo studio degli ejecta vulcanici (Funiciello & Parotto 1978). Tale successione è costituita dalla successione carbonatica mesozoico-cenozoica, calcari e marne depostesi nei bacini toscano e sabino; al di sopra di tale successione, si ritrova la copertura terrigena del *Flysh* ligure, depostosi per gravità durante le prime fasi dell'orogenesi appenninica (Funiciello &

Parotto 1978). La successione carbonatica-terrigena si riconosce disarticolata in alti e bassi strutturali legati alla tettonica estensionale sovrimposta spesso su *thrust* preesistenti a direzione NO-SE. Il tetto della successione è stato incontrato in diversi sondaggi a profondità diverse: da poche centinaia di metri (via C. Colombo, G.R.A.) fino un massimo di 1300 metri dal piano campagna in zona Circo Massimo (Signorini 1939).

La fase post-orogena inizia con la sedimentazione terrigena marina al di sopra del substrato deformato prima descritto, ed interessa in modo diacrono il margine tirrenico durante il Messiniano-Pliocene inferiore. Durante il Pleistocene inferiore la costa laziale inizia ad assumere l'aspetto attuale in seguito ad una progressiva continentalizzazione degli ambienti marini. A partire dal Pleistocene medio i distretti vulcanici laziali cominciano ad eruttare migliaia di metri cubi di magma generalmente in composizione ricca in potassio e conseguente messa in posto di notevoli volumi di materiale piroclastico. Con questi depositi, l'area romana assume l'aspetto piuttosto dolce attuale e si prepara ad essere incisa e poi colmata di sedimenti ripetutamente dall'azione morfogenetica del suo corso d'acqua principale ed affluenti, durante le epoche, rispettivamente , di stazionamento basso e risalita del livello del mare.

La successione post-orogena comprende i depositi di mare aperto della formazione di Monte Vaticano (Pliocene p.p.) al di sopra del quale, in discordanza, si deposita la successione di ambiente schiettamente continentale, sedimentaria, vulcanica e vulcanoclastica del Pleistocene medio-Olocene.

All'interno della successione plio-quaternaria sono presenti molte superfici di discontinuità sia regionali sia locali, che illustrano le complesse relazioni tra tettonica, vulcanismo e sedimentazione.

La più antica delle superfici di *unconformity* di importanza regionale si riconosce alla base dei sedimenti marini del Pleistocene Inferiore della formazione di Monte Mario, mentre al suo etto si individua la successiva superficie che ospita al di sopra i sedimenti continentali del paleodelta del Tevere (formazione di Ponte Galeria). Le superfici che si incontrano poi, si ringiovaniscono via via e terrazzano i depositi fluviali del Tevere, legate alle oscillazioni eustatiche del livello marino durante il Pleistocene medio e superiore e colmate da depositi molto eterogenei in facies fluvio-lacustre (formazione di S. Cecilia, Valle Giulia, del Fosso del Torrino, Aurelia, Vitinia, Saccopastore). Tali fasi deposizionali sono contemporanee all'attività vulcanica dei Colli Albani, a sud-est di Roma.

A partire dal Pleistocene medio l'attività vulcanica albana è caratterizzata dalla messa in posto di una complessa successione di depositi ignimbritici, da rare colate di lava e subordinatamente da caduta e da *lahar*. Tale successione è attribuibile a quattro distinti apparati eruttivi, o litosoma (Litosoma Vulcano Laziale, Tuscolano-Artemisio, delle Faete e di Via dei Laghi). Essi affiorano prevalentemente in riva sinistra della valle del Tevere, mentre in riva destra al di sopra delle unità plio-pleistoceniche marine e continentali, affiorano estesamente i depositi da ricaduta ed ignimbritici del distretto vulcanico sabatino. I depositi vulcanici e vulcanoclastico più recenti datano all'Olocene l'attività vulcanica del distretto dei Colli Albani e sono distribuiti nella zona di Ciampino; questo dato innovativo presentato nella "Carta Geologica di Roma" (Funiciello & Giordano 2008), dove vengono cartografati i depositi di *lahar* di epoca storica nella formazione del Tavolato, ridefinisce il vulcano dei Colli Albani come un vulcano attivo e quiescente (Funiciello *et alii* 2002, 2003).

Dal punto di vista tettonico la struttura principale dell'area romana è l'alto strutturale di Monte Mario, che costituisce con il Gianicolo una dorsale a direzione NO-SE, legata al sollevamento dei sedimenti marini plio-pleistocenici, una delle poche località in cui sono affioranti, tra il Pleistocene inferiore ed il medio, dovuto ad una cinematica essenzialmente estensionale. Il sollevamento dell'alto ha avuto importanti conseguenze geomorfologiche ed ha determinato la diversione del Tevere che è stato forzato a cambiare il suo corso per scorrere parallelamente alla costa verso sud-est con la deposizione di ingenti spessori di conglomerati sabbie ed argille (formazione del Fosso della Crescenza), prima di assumere la configurazione attuale, dovuta alla messa in posto dei depositi vulcanici che l'hanno ricondotto verso le pendici dell'alto.

6.1 EVOLUZIONE PALEOGEOGRAFIA ED EUSTATISMO

Le unità affioranti nel territorio del comune di Roma e quelle presenti nei primi 100 m di spessore, nonché la morfologia della campagna romana, sono il risultato della storia geologica degli ultimi 5 Ma. Nel Pliocene inferiore (Fig. 42) inizia infatti la sedimentazione post-orogene nell'area romana, sedimenti marini in facies argillosa della Formazione di Monte Vaticano, l'unità più antica affiorante nel comune di Roma, presso l'alto di Monte Mario, depostesi su un basamento carbonatico-silico-marnoso

notevolmente articolato (Funiciello & Parotto 1978, Parotto 1995, 2008). La sedimentazione si istaura in un ambiente subsidente legato al sistema orogene-avanfossa appenninico, in progressivo ampliamento, probabilmente condizionata da una tettonica attiva. Le argille plioceniche in spessori molto variabili e spesso fagliate, sono ricoperte in discordanza angolare dalla Formazione di Monte Mario, i cui sedimenti poggiano su una superficie trasgressiva, individuata come base del Supersintema Acqua-Traversa. La formazione è costituita da argille sabbiose, limi sabbiosi e sabbie grigie con faune a molluschi che indicano un ambiente infralitorale e di transizione, datati al Santerniano.

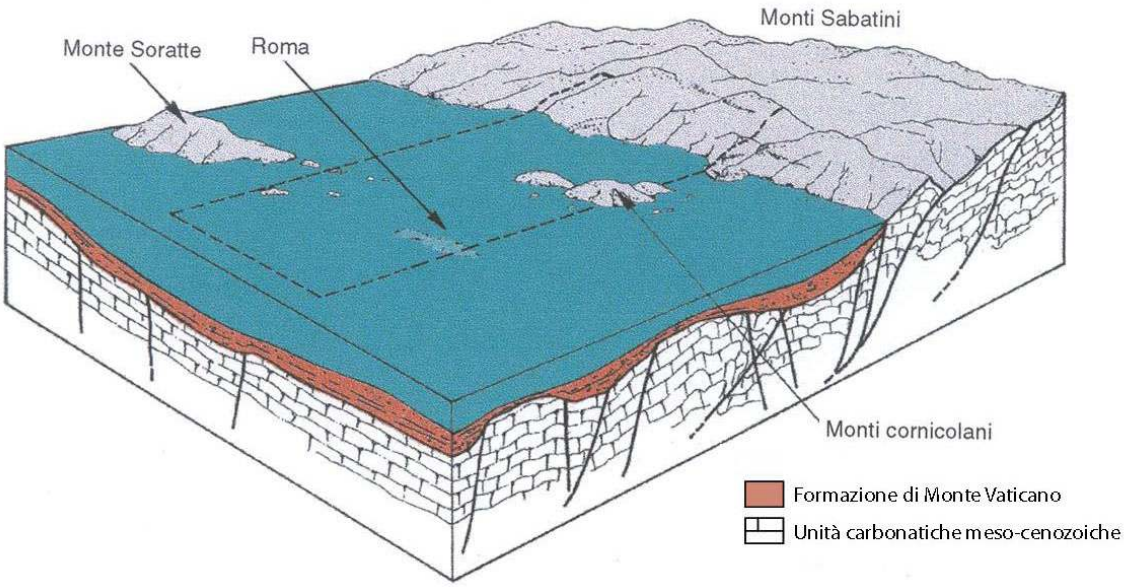


Figura 42: Paleogeografia del Lazio centrale costiero verso la fine del Pliocene (vista da S verso N.

Durante il Pleistocene inferiore dunque, si verifica un sollevamento generalizzato dell'area, come testimonia la presenza di lacune stratigrafiche tra le marne vaticane e la Formazione di Monte Mario, a cui segue una trasgressione marina che riporta il mare nell'area ma a profondità minori. Tale momento è responsabile di una serie di faglie di modesto rigetto nelle argille vaticane, suturate dai sedimenti della Formazione di Monte Mario. A partire dal Pleistocene medio si assiste ad una progressiva continentalizzazione degli ambienti deposizionali, derivante prevalentemente dal modellamento fluviale, fortemente condizionato dalle variazioni climatiche e quindi eustatiche. Tale processo è imputabile ad un sollevamento del margine appenninico, probabilmente per riequilibrio isostatico, che provoca il graduale ritiro del mare verso ovest. In questo momento il principale agente

morfogenetico diventa il Paleotevere con i suoi affluenti, i cui sedimenti hanno origine dall'erosione delle successioni carbonatiche meso-cenozoiche in catena. Tali depositi fluviali, costituite da ghiaie, sabbie e limi, corrispondono alla Formazione di Ponte Galeria, datata tra la parte alta del Pleistocene inferiore e la parte bassa del Pleistocene medio. La formazione di Ponte Galeria si arresta bruscamente verso E contro l'attuale rilievo di Monte Mario. Il motivo dell'assenza dei depositi della Formazione di Ponte Galeria è di natura tettonica: il sollevamento delle marne vaticane, iniziato alla fine del Pliocene, continua anche dopo la deposizione della Formazione di Monte Mario ed il rilevo così formatosi costringe il Paleotevere a deviare il suo percorso e a scorrere più a SSE, verso l'attuale pianura pontina (Fig. 43a).

Ad est di Monte Mario si ritrovano invece i depositi fluviali del Fosso della Crescenza, ghiaie fluviali, seguite da sabbie, con argille e limi di ambiente palustre. Depositi analoghi sono stati individuati in sondaggio sotto la parte orientale della città, lungo la direttrice NNO-SSE, con spessori fino a 60 metri. Nella parte sommitale dei depositi del Fosso della Crescenza la presenza di lenti sabbiose con scorie vulcaniche e pomici indicano l'inizio dell'attività vulcanica esplosiva nell'area laziale, conseguenza dell'assottigliamento crostale evidenziato dalla tettonica attiva di tipo estensionale plio-pleistocenica. Circa 600.000 anni fa iniziano ad edificarsi i centri vulcanici sabatino, ad NO ed albano, a SE. Sebbene un inizio di attività dei centri vulcanici sabatini sia datato a 0.8-0.58 Ma fa, l'emissione di grandi volumi di prodotti si ha intorno ai 0.55 Ma fa, con la messa in posto del tufo giallo della via Tiberina. L'estensione dei prodotti fu tale da lambire l'alto di Monte Mario e sbarrare nel settore orientale il corso del Paleotevere (Alvarez 1972), che fu ad aggirare il rilevo a est ed impostarsi nel suo attuale percorso. Con tempi simili, a differenza dei numerosi ed articolati centri sabatini, il vulcano dei Colli Albani si accresce come un apparato centrale complesso, con stili eruttivi diversi e diversi spessori emessi. Le coltri ignimbritiche intercalate a spandimenti lavici, a prodotti di ricaduta, formano un vasto plateau intorno all' edificio centrale (Fig. 43b). I depositi iniziali dell'attività testimoniano una forte interazione con acque superficiali, probabilmente qualche ampio lago o palude, istauratosi lungo il percorso del Paleotevere, come testimoniano i sedimenti di orine palustre del Fosso della Crescenza, infine colmato dalle eruzioni.

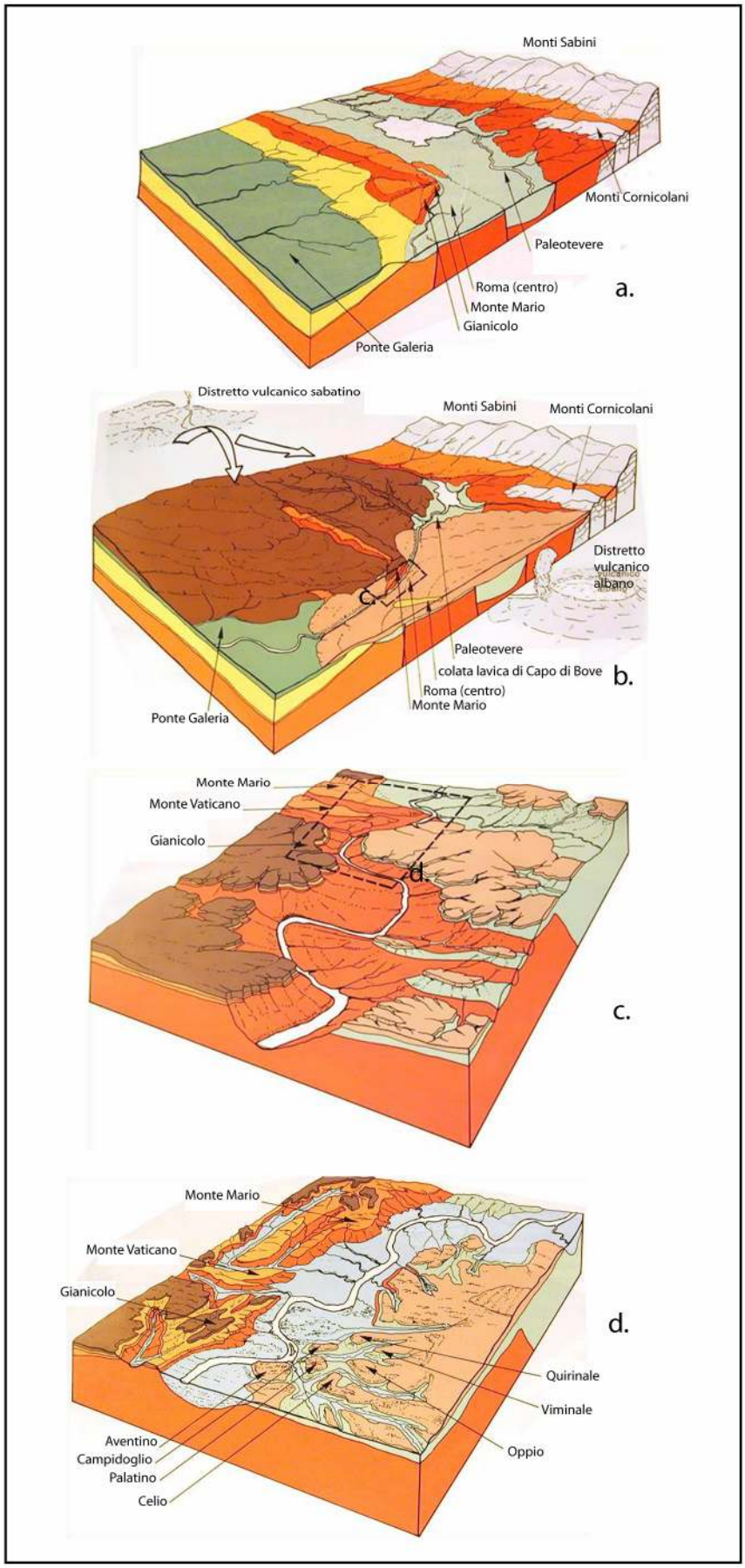

Monti Sabini
Monti Cornicolani
Paleotevere
Roma (centro)
Monte Mario
Gianicolo
Ponte Galeria
a.
Distretto vulcanico sabatino
Monti Sabini
Monti Cornicolani
Distretto vulcanico albano
c.
Paleotevere
colata lavica di Capo di Bove
Roma (centro)
Monte Mario
Ponte Galeria
b.
Monte Mario
Monte Vaticano
Gianicolo
d.
c.
Monte Mario
Monte Vaticano
Gianicolo
d.
Quirinale
Viminale
Oppio
Aventino
Campidoglio
Palatino
Celio

Figura 43: (pagina precedente) Quadro paleogeografico dell'area romana in diversi momenti geologici: a) durante il Pleistocene medio, dopo la deposizione delle serie marine del Pleistocene inferiore si ha l'emersione e l'inizio della sedimentazione continentale da parte del Paleotevere; b) inizio dell'attività vulcanica dei Colli Albani e dei Sabatini (l'area tratteggiata corrisponde alla rappresentazione c.) e modificazione del percorso del Paleotevere; c) erosione delle unità in seguito all'abbassamento del livello marino circa 10000 anni fa (glaciazione wurmiana (l'area tratteggiata corrisponde alla rappresentazione d.); d) riempimento della valle del Tevere in seguito all'innalzamento del livello marino e sviluppo dell'attuale morfologia su cui sorge la città di Roma e come doveva apparire prime delle modificazioni antropiche.

I depositi ignimbritici, succedutesi nel tempo fino a circa 200.000 anni fa, costituiscono un ulteriore impedimento al corso del Paleotevere che si apre un varco verso ovest. Mentre i depositi si mettono in posto in relazione all'evoluzione della camera magmatica, l'erosione fluviale operata dal Tevere e dai suoi affluenti modella il plateau, disarticolandolo e dandogli l'aspetto che oggi noi osserviamo. L' energia dei corsi d'acqua, la capacità erosiva fluviale viene ritmata dai cambiamenti climatici, i quali regolano il livello di base marino. Attraverso lo studio degli isotopi dell'ossigeno è possibile ricostruire il succedersi degli eventi climatici. Inoltre sul terreno si riconoscono diverse superfici erosive che indicano periodi di stazionamento basso del livello del mare (regressioni marine) e successivo accumulo di sedimenti in un periodo di stazionamento alto. In Figura 44 si illustrano le principali superfici erosive riconosciute corrispondenti ad altrettanti sintemi.

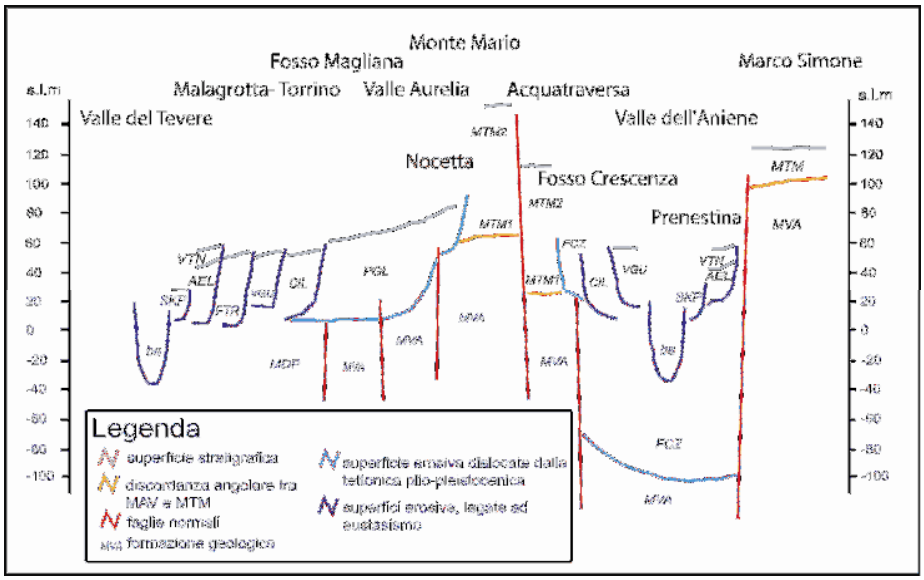


Figura 44: Diagramma riassuntivo dell'assetto delle superfici di unconformity nell'area del Foglio Roma (modificato da Funiciello & Giordano 2008)

L'ultima fase evolutiva della campagna romana è segnata dall'ultima glaciazione, a partire da circa 80.000 anni fa, quando il livello del mare scese progressivamente di oltre 110 metri (fase würmiana). L'attività erosiva, rimasta incontrastata, si intensifica ed il Tevere

con i suoi affluenti incidono profonde valli nei depositi vulcanici e pre-vulcanici, fino a raggiungere le formazioni marine plio-pleistoceniche (Fig. 43c).
Con la fine della fase glaciale e la progressiva risalita del mare, le incisioni fluviali vengono colmate da sedimenti fluviali per spessori fino a 60 metri (Fig. 44d). Il reticolo delle paleovalli incise in fase glaciale è completamente colmato da prodotti freatomagmatici da flusso piroclastico e da lahar provenienti dal cratere di Albano.

Nel giro di poco meno di tremila anni, l'uomo ha utilizzato e modificato estesamente questo territorio, sfruttandone spesso in modo intelligente le sue caratteristiche naturali, altresì in modo sconsiderato, colmando valli, sbarrando e "tombando" corsi d'acqua, demolendo colline, alzando rilevi di riporti o impermeabilizzando il suolo ed inquinando. Attualmente il paesaggio urbano romano è quindi sensibilmente diverso da quello pre-insediamento e le continue necessità antropiche socio-economiche produrranno verosimilmente altri cambiamenti e l'impegno e la sfida saranno quelle di armonizzarli con le caratteristiche naturali del sito.

6.2 IL VULCANISMO LAZIALE

La città di Roma si trova nella zona distale dei plateau ignimbritici, laddove i depositi del Distretto Vulcanico Sabatino a N si interdigitano con quelli del Vulcano dei Colli Albani a S.
Il Distretto Vulcanico Sabatino è caratterizzato da una distribuzione di centri vulcanici molto articolata nel tempo e nello spazio (Giordano 2008). Sebbene un'attività precoce sia segnalata da depositi di tefra datati a 800000 anni, l'attività vulcanica continua e con volumi significativi di prodotti, inizia a 550000 anni fa, in concomitanza con le fasi iniziali dell'attività vulcanica ai Colli Albani. I prodotti più antichi, affioranti nell'area di Morlupo-Castelnuovo di Porto lungo la via Flaminia, sono lave rachitiche e prodotti piroclastici freatomagmatici. Successivamente l'attività si sposta verso il centro di Sacrofano a cui appartengono i prodotti della via Tiberina, l'unità di Prima Porta e quelli da ricaduta dei Tufi stratificati varicolori di Sacrofano e di La Storta ed in ultimo l'unità di via Nomentana-Tufo giallo di Sacrofano Auctt. A circa 400000 anni, i centri di attività vulcanica si estendono ancora più a ovest dove si forma progressivamente la caldera di Bracciano (De Rita *et alii* 2006). Tra i 250000 e gli 80000 anni l'attività vulcanica

diminuisce nei volumi ed è legata a vulcanismo monogenico da coni di scorie e fessure eruttive o centri freatomagmatici (*tuff cones, maar*). Nel territorio del comune di Roma si ritrovano le *facies* distali dei depositi ignimbritici più voluminosi e quelli da ricaduta, legati al vulcanismo sabatino, principalmente nel settore N della città, ma è affiorante anche nella parte orientale con minore estensione.

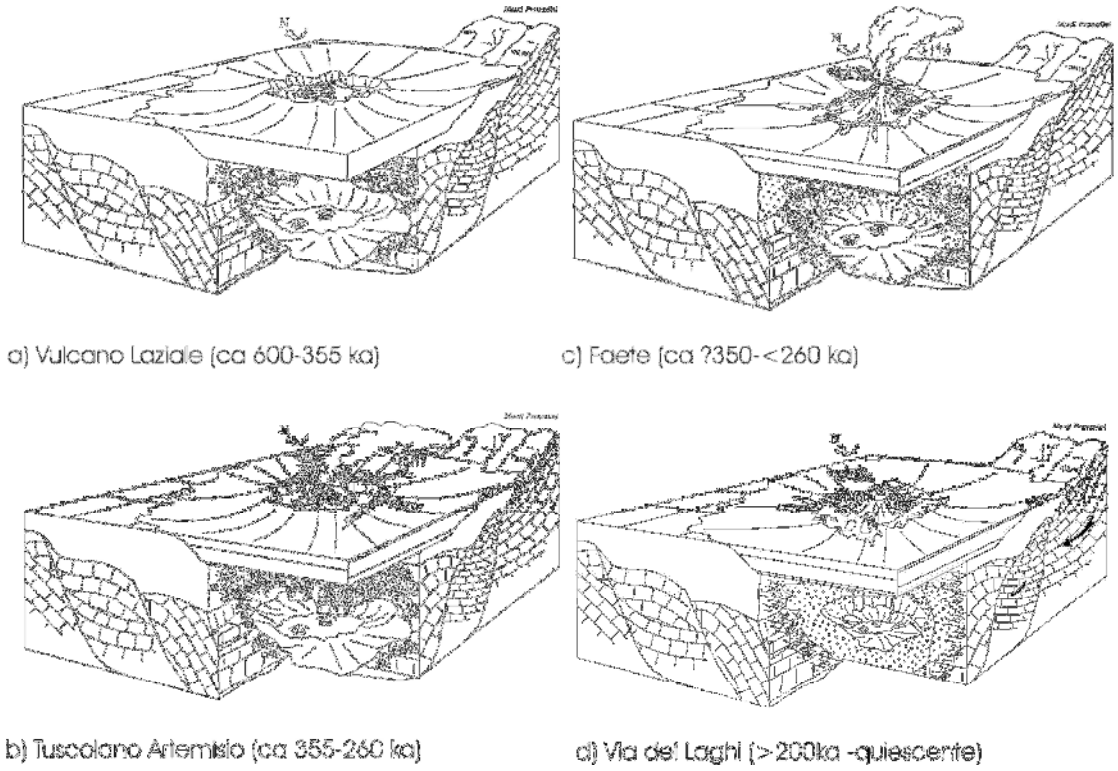


Figura 45: Ricostruzione della storia del vulcano dei Colli Albani, attraverso la formazione successiva dei quattro litosomi, a) il Litosoma Vulcano Laziale, b) il Litosoma Tuscolano Artemisio, c) il Litosoma Faete, d) Il litosoma Via dei Laghi (da Giordano *et alii* 2006a).

Il vulcano dei Colli Albani è, invece, un apparato centrale complesso, oggi quiescente, caratterizzato nel corso della sua evoluzione da importanti cambiamenti nello stile e nei tassi eruttivi. La ricostruzione dei diversi edifici vulcanici, rintracciabile a partire dai depositi emessi, riconduce a tre edifici principali (Fig. 45): 1. litosoma Vulcano Laziale, 2. litosoma Tuscolano-Artemisio, 3. litosoma Faete, 4. litosoma Via dei Laghi.
Nell'area urbana di Roma affiorano i depositi distali di tre litosoma: Litosoma Vulcano Laziale, Tuscolano-Artemisio e Via dei Laghi.

Il litosoma Vulcano Laziale raccoglie tutte le unità ignimbritiche principali eruttate dal vulcano, intercalate dagli spandimenti lavici ed ai prodotti da ricaduta e di rimaneggiamento. I depositi di tale litosoma formano un plateau continuo con pendenze

molto basse distribuito a 360° intorno all'area calderica. I depositi ad esso associati sono dal più antico: unità di Trigoria, unità di Tor de' Cenci, unità del Palatino, unità di Casal del Cavaliere (corrispondenti queste quattro alla "successione dei tufi pisolitici" di De Rita *et alii* 2002, ossia ai "Tufi antichi", "Tufi grigi e granulari" e "Tufi Pisolitici" *Auctt*), Pozzolane Rosse, Pozzolane Nere, Formazione di Villa Senni (corrispondente queste ultime tre al "Complesso dei Tufi Inferiori" di Fornaseri *et alii* 1963). La Formazione di Villa Senni è l'unità ignimbritici del litosoma che presenta i maggiori volumi eruttati in assoluto durante un singolo evento eruttivo. I prodotti di questo litosoma rappresentano circa il 90 per cento dell'intero volume eruttato e ben si identificano con la struttura principale del vulcano (Giordano 2008).

Il litosoma Tuscolano-Artemisio, descritto per la prima volta da Fornaseri *et alii* (1963), è costituito da un bastione continuo alto fino a qualche centinaio di metri formato da una serie di coni di scorie, scorie saldate e lave coalescenti, emessi da fratture concentriche alla caldera. Il significato di questa importante struttura fissurale è connesso all'ultimo collasso della caldera a seguito dell'eruzione della formazione di Villa Senni a 355 ka. Infatti a 300 ka (Karner *et alii* 2001) l'attività vulcanica è drasticamente cambiata ed in seguito allo svuotamento della camera magmatica, ha portato alla risalita di minori quantità di magmi essenzialmente degassati o poveri in gas, che hanno dato origine alle eruzioni effusivi e blandamente esplosive da cui si è formata la struttura del Tuscolano-Artemisio (Giordano 2008).

Il litosoma Faete è individuato dal rilevo topografico dell'edificio intercalderico delle Faete. E' uno stratocono regolare principale con versanti inclinati fino a 45° lungo cui sono presenti alcuni coni di scorie avventizi di dimensione minore. I prodotti eruttati sono scorie e lave relative ad attività di fontane di lava di tipo stromboliano-subpliniano, costituenti la formazione di Rocca di Papa.

Il Litosoma Via dei Laghi è il più recente e racchiude i prodotti della attività eccentrica prevalentemente freatomagmatica che ha caratterizzatola parte finale dell'attività eruttiva dei Colli Albani dopo l'edificazione dell'edificio delle Faete. In realtà è un litosoma composito costituito da più litosoma minori indipendenti quanti sono i *maar* ed i coni di scorie che intersecano la struttura del vulcano lungo i versanti settentrionale ed occidentale. Probabilmente tale attività è da attribuire ad una ulteriore forte riduzione di volumi magmatici coinvolti che hanno favorito l'interazione acqua-magma in rapporto tale per l'innesco di eruzioni fratomagmatiche.

I depositi più antichi di questo litosoma sono datati a 200 ka (Voltaggio & Barbieri 1995, Marra *et alii* 2003), mentre i più recenti sonno olocenici, datati in base al ritrovamento di depositi freatici e da lahar relazionati ad esondazioni del Lago Albano, fino a 5.8 ka all'interno della formazione del Tavolato (Funiciello *et alii* 2002, 2003, Giordano *et alii* 2005).

6.3 STRATIGRAFIA

Le unità litostratigrafiche presenti nell'area romana risultano dall'evoluzione post-orogena del margine tirrenico laziale a partire dal Pliocene inferiore fino all'Olocene. Nella nuova carta geologica dell'area romana, pertinente al foglio Roma 347, l'organizzazione stratigrafica delle unità geologiche è in accordo con i principi del riconoscimento di unità a limiti in conformi (UBSU), collocandole all'interno dei supersintemi e sintemi a cui appartengono. Attraverso tale metodologia che individua spessori di rocce delimitate da superfici erosive di diverso genere ed ordine gerarchico, vengono messi in evidenza i diversi momenti evolutivi dell'area e l'estrema variabilità verticale e laterale delle *litofacies* presenti all'interno delle singole unità litostratigrafiche incontrate.
In Figura 46 sono illustrati i rapporti stratigrafici laterali e verticali tra le diverse unità presenti nell'area ed in Tabella 9 è presentata una sintesi della loro organizzazione.

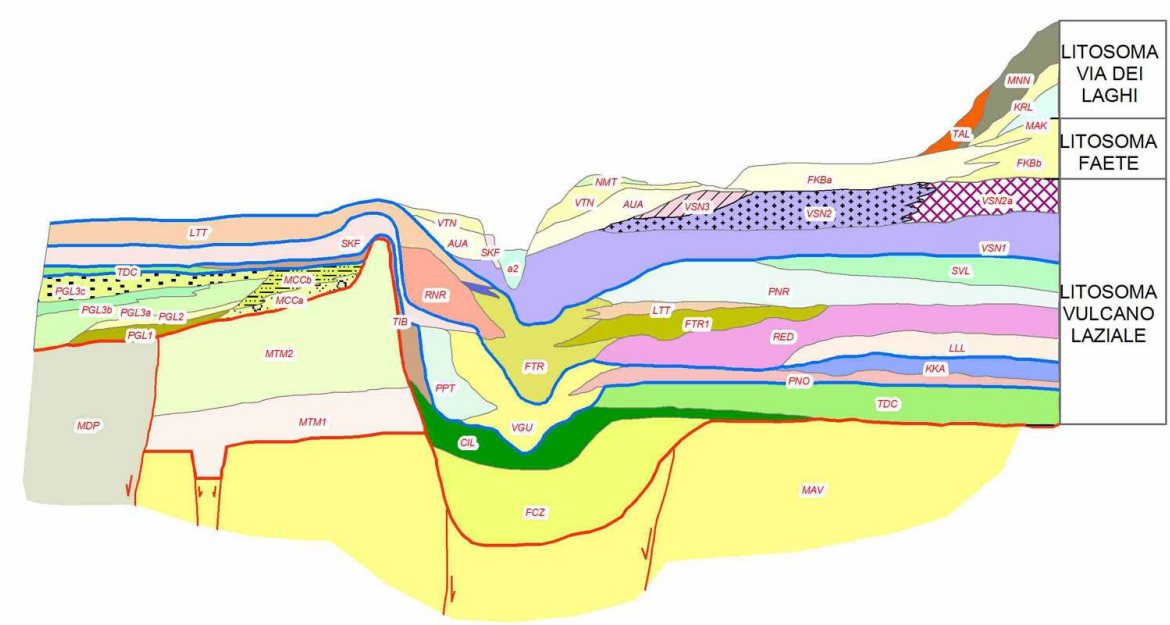


Figura 46: Schema dei rapporti stratigrafici esistenti tra le vari unità geologiche individuate nell'area romana a patire dal Pliocene fino ad oggi (dalla Nuova Cartografia Geologica Foglio Roma, Funiciello & Giordano 2008), per le sigle vedi testo o APPENDICE I.

Di seguito vengono infine illustrate le varie formazioni che caratterizzano l'area romana, a partire dalla più antica fino alla più recente, ripercorrendo attraverso i relativi depositi, l'evoluzione paleogeografica dell'area stessa che ne ha consentito la deposizione.

Età	Super sintema	Sintema	Unità litostratigrafica	Litofacies
Pliocene Inf-Sup	--	--	MVA	
Plio-Pleistocene	AE (Acquatraversa)	--	MTM MDP	MTM1
Pleist Inf-Sup	AU (Aurelio-Pontino)	MNL (Magliana)	PGL1 PGL2 PGL3 PGLa PGLb FCZ	a b c
		LMN (Flaminia)	CIL TDC TIB	--
		VGL (Villa Glori)	VGU PTI PPT KKA SKF	--
		TNO (Torrino)	LLL RED FTR RNR LTT RMN PNR SLV	FTR1 b
		QTA (Quartaccio)	VSN AEL FKB VTN NMT	VSN1 VSN2a,b VSNa a b
		ANE (Fiume Aniene)	SKP	--
		SFT (Fiume Tevere)	MAK MNN	--
Pleist Sup-Olocene	--	SFT (Fiume Tevere)	TAL SFTe2 SFTba SFTbb h h1	--

Tabella 9: Schema riassuntivo delle principali unità litostratigrafiche dell'area romana a partire dal Pliocene Inf. sino ai giorni nostri, suddivise in accordo con i criteri UBSU, secondo quanto descritto nella nuova carta geologica di Roma (Funiciello & Giordano 2008); per le sigle consultare l'Appendice I.

6.3.1 UNITÀ PRE-VULCANICHE DI AMBIENTE MARINO:

La sedimentazione marina risale al Pliocene Inferiore con una progressiva diminuzione della profondità del mare fino al Pleistocene Inferiore, periodo dopo il quale si ha la continentalizzazione dell'area romana.

I sedimenti pliocenici di mare aperto sono presenti in affioramento ma non ne è mai esposto il letto. Esso è noto da sondaggi profondi perforati nell'area e risulta in contatto con il *flysch* di tipo liguride. La quota del letto è piuttosto variabile ed oscilla dai -900m slm in zona Circo Massimo (Signorini 1939) ai -300 m slm (AGIP 1990, dati inediti).

Il substrato risulta fortemente articolato e si suppone una forte azione della tettonica durante la sedimentazione (Funiciello & Giordano 2008). La sedimentazione pliocenica è rappresentata dalla FORMAZIONE DI MONTE VATICANO (MAV), costituita da argille marnose grigie e grigio-azzurre stratificate, da consolidate a molto consolidate, alternate a sabbie fini quarzoso-micacee da massive a gradate, da grigie a giallo ocra, in strati da sottili in banchi. L'analisi micropaleontologica (Cosentino *et alii* 2004,2008) ha mostrato la presenza di ostracodi batiali (*Krithe compressa* e *Henryhowella sarsi profunda*) che individuano un ambiente batiale superiore con profondità comprese tra i -200 e i -350 m slm. I depositi delle marne vaticane si trovano in affioramento lungo la riva destra del Tevere, lungo la struttura Monte Mario-Gianicolo con quote massime di 110 m slm e spessore di affioramento di 100 m. Gli stessi depositi risultano ribassati da una faglia direttrice NO-SE tra i 40 e i 20 m slm. A N del Fiume Aniene, in zona Marco Simone, la formazione affiora nuovamente fino a 130 m slm. Verso l'alto il deposito si arricchisce di una componente siltoso-sabbiosa.

Il passaggio al Pleistocene è segnato da una superficie di erosiva discordante (Ponzi 1872, Blanc 1942, Ambrosetti & Bonadonna 1967, Conato *et alii* 1980, Marra *et alii* 1995, Funiciello & Giordano 2008) di valore regionale, che delimita la base del supersintema dell'Acquatraversa (AE). La formazione che segue a quella di Monte Vaticano è la FORMAZIONE DI MONTE MARIO (MTM) che sutura evidenti sistemi di faglie estensionali. La MTM è una successione pleistocenica di argille e sabbie ed è costituita da una serie di membri (5 secondo quanto proposto da Cosentino *et alii* 2008), di cui il primo è il membro del Farneto (MTM1). Tale deposito è formato da un'alternanza di argille grigie sabbiose con macrofossili, limi sabbiosi e sabbie poco argillose grigie, con frequenti livelli torbosi ed orizzonti ossidati, ricchi in foraminiferi bentonici. Il residuo inorganico è costituito da quarzo, mica e rara glauconite. L'analisi micropaleontologica ad ostracodi ha definito un

ambiente infra-circalitorale, con paleoprofondità tra i -40 e i -80 m (Cosentino *et alii* 2004, 2008). Le caratteristiche stratigrafiche della formazione MTM sono ben evidenti nella zona dei Monti della Farnesina dove la successione è bene esposta lungo una sezione continua.
Al di sopra del membro del Farneto, MTM1, sono presenti sabbie grossolane grigie quarzoso micacee ad *Artica Islandica* e ricche di malacofauna. Lo spessore di queste sabbie è di 4 m nella zona dei Monti della Farnesina e si esaurisce verso S. Verso l'alto le sabbie grigie passano in continuità a sabbie gialle quarzose e arenacee bioclastica con frammenti frequenti di bivalvi e radioli di echinidi, a laminazione incrociata a basso angolo. Lo spessore massimo delle sabbie gialle è di 40 m. Al di sopra delle sabbie gialle si passa verso l'alto ad alternanze di sabbie gialle molto fini a laminazione incrociata, con liveli di sabbie grossolane rossastre o livelli di conglomerato di battigia a ciottoli di selce appiattiti ed embricati e di argille azzurrognole plastiche. Lo spessore di tali depositi di ambiente transizione è variabile da circa 30 m nella zona dei Monti della Farnesina a circa 70 m lungo il Fosso dell'Acquatraversa, dove l'unità è ribassata per faglia. Nel complesso la formazione di Monte Mario ha uno spessore di 140 m, ma il limite di tetto sempre erosivo, lo definisce come spessore minimo.
Al pleistocene inferiore sono attribuite le argille e argille sabbiose grigio verdastre della FORMAZIONE DI MONTE DELLE PICHE (MDP), la cui continuità stratigrafica con MTM non è possibile verificarla per mancanza di affioramenti. L'ambiente di sedimentazione è circalitorale e numerosi autori (Conato *et alii* 1980, Carboni 1980) ritengono le due unità deposte in successione.

6.3.2 UNITÀ PREVULCANICHE DI AMBIENTE CONTINENTALE:

La superficie discordante che chiude al tetto il supersintema dell'Acquatraversa segna la definitiva continentalizzazione dell'area romana. Essa costituisce la base del successivo supersintema Aurelio-Pontino (AU). La superficie è complessa e rappresenta l'inviluppo di molteplici superfici diacronie sviluppatesi a partire dal Pleistocene inferiore, sia per motivi legati al sollevamento regionale del margine tirrenico, sia per l'azione della tettonica locale legata al sollevamento della dorsale di Monte Mario, sia per fattori climatici. La sedimentazione al di sopra di tale superficie si esplica in diversi sintemi, di cui il primo, inferiore, è quello della Magliana, influenzato solo dagli apporti del Paleotevere e prosegue poi con l'inizio dell'attività vulcanica ed il contributo vulcanoclastico nei successivi sintemi.

Il sistema Magliana (MNL) accoglie i primi depositi continentali fluvio-palustri del Paleotevere e del Fosso della Crescenza. La FORMAZIONE DI PONTE GALERIA (PGL) è il primo deposito francamente continentale che affiora nell'area romana nella zona di Ponte Galeria, e, in particolare, rappresenta un ambiente di delta con passaggio da *facies* continentali a *facies* infralitorali ed intertidali. E' un deposito fluviale del Paleotevere, la cui successione tipica è stata descritta da Conato *et alii* (1980) ed è composta dal basso verso l'alto: (1) conglomerati basali di ambiente fluviale per uno spessore di 10 m (PGL1); (2) argille grigio azzurre ad Helicella *ericetorum* con uno spessore di 4 m (PGL2); (3) conglomerati e sabbie gialle di spiaggia ad *Artica islandica* per 1 m; (4) conglomerati e sabbie a laminazione incrociata per 20 m (PGL3 membro della pisana: PGL3a- *facies* conglomeratici sabbiosa); (5) Argille a *Venerupis senescens* per 2 m (PGL3b- *facies* argilloso-sabbiosa); (6) sabbie salmonate di ambiente eolico per 1.5 m (PGL3c- *facies* sabbiosa di ambiente da duna a retroduna). La provenienza del materiale è di tipo appenninica, legata all'erosione della successione meso-cenozoica sabina in catena. Le stesse variazioni di facies verticali si riscontrano anche in orizzontale e dal punto di vista cartografico nel nuovo foglio "Roma" si sono differenziati ulteriormente un deposito di facies conglomeratica (PGLa) di ambiente di spiaggia, affiorante a quote più elevate lungo le pendici di Monte Mario (unità di Monte Ciocci, Marra & Rosa 1995), al di sopra del quale e lateralmente si riconoscono livelli argillosi a *Venerupis senescens* e sabbie ocracee a stratificazione incrociata (PGLb).

I depositi della PGL sono stati abbondantemente cavati (sabbie, ghiaie ed argille) ed ampiamente utilizzati come inerti per l'edilizia e la costruzione stradale.

Altro deposito fluviale del sistema MNL, di età successiva alla PGL, è la FORMAZIONE DEL FOSSO DELLA CRESCENZA (FCZ), affiorante lungo l'omonimo corso e costituito da una successione, dal basso verso l'alto, di ghiaie basali in matrice sabbioso quarzosa arrossata, di sabbie fini giallo ocra interstratificate a limi e argille grigio verdastre con frustoli vegetali. Lo spessore massimo è di 42 m e i depositi si presentano privi sostanzialmente di materiale vulcanico, ma la presenza di pirosseni e scorie nella parte sommatale, indica una deposizione in parte sincrona all'inizio dell'attività vulcanica laziale (Pleistocene medio - parte bassa). Tale formazione è ben riconoscibile in sondaggio e dalla ricostruzione paleoambientale, testimonia la diversione del Tevere parallelamente alla costa verso SE (Manfredini 1990).

6.3.3 UNITÀ VULCANICHE, SINVULCANICHE E VULCANOCLASTICHE

Nel Pleistocene medio ha inizio l'attività vulcanica laziale, il Distretto Vulcanico Sabatino prima e il vulcano dei Colli Albani poi. Il sistema che raccoglie questa prima attività è quello denominato Flaminia (LMN), che presenta una superficie di *unconformity* basale molto articolata ed ad alto rilievo. Essa ospita al suo interno i primi depositi fluviali e fluvio-palustri a dominante componete vulcanoclastica e i primi depositi vulcanici primari provenienti dalle eruzioni ignimbritiche di grande volume sia dei Colli Albani sia dei Sabatini. La distribuzione dei depositi fluviali testimonia come il Paleotevere che scorreva verso SE (depositi FCZ) viene risospinto verso N e forzato a scorrere reincidendo le pendici di Monte Mario per trovare uno sbocco al mare. La ricostruzione paleoambientale attribuisce alla messa in posto degli ingenti volumi di prodotti vulcanici, l'ostruzione del corso del Paleotevere e la conseguente cattura fluviale all'altezza dell'attuale corso del Tevere in area urbana, da parte di uno dei fossi minori.

La FORMAZIONE DI S. CECILIA (CIL) rappresenta il deposito fluviale alla base del sistema LMN, costituito dall'alternanza di depositi di conglomerati, sabbie e limi ad elementi vulcanici. L'unità è presente alla base dei colli di Roma nella zona del centro urbano, nota da sondaggio e caratterizzata da litofacies sabbioso-ghiaiose ad elementi vulcanici.

Verso l'alto troviamo l'UNITÀ DI TOR DE CENCI (TDC), primo deposito piroclastico cartografabile alla scala del rilevamento, di pertinenza albana. Si presenta come un deposito grigio giallastro cineritico, litoide per zeolitizzazione. I suoi spessori variano in funzione della paleotopografia, con spessori massimi lungo le paleovalli e minimi sui paleoalti dove presenta uno spessore costante di circa 1 m. Segue l'UNITÀ DELLA VIA TIBERINA (TIB), affiorante nel settore N della città, deposito piroclastico cineritico riferibile ad una eruzione ignimbritica del settore orientale del Distretto Vulcanico Sabatino.

I depositi del sistema Flaminia sono fortemente incisi da una superficie ad alto rilievo, evidente lungo tutto il corso del Tevere e rappresenta la superficie di base del sistema Villa Glori (VGL). Il deposito basale è costituito dalla FORMAZIONE DI VALLE GIULIA (VGU). Alla base il deposito è caratterizzato da livelli di ghiaie minute poligeniche con ciottoli calcarei e di selce, con presenza di concrezioni calcaree e livelli con materiale vulcanoclastico. Nella parte centrale sono presenti travertini e travertini terrosi fitoclastici in banchi, inglobanti sabbie e ghiaie vulcanoclastiche. La serie sedimentaria si chiude verso l'alto con sabbie e limi sabbiosi a concrezioni carbonatiche. Tale deposito è

significativamente correlabile con i bachi di travertino presenti nell'are N, allineate NO-SE, esatta proiezione della faglia cordiera meridionale dell'alto di Monte Mario. La presenza di fluorite e l'attività idrotermale correlata alla deposizione dei travertini evidenzia una elevata circolazione di fluidi ricchi in $CaCO_3$ e di F di probabile origine profonda e perivulcanica. A questo deposito fanno seguito una serie di depositi vulcanici che, dal più antico, sono: l'UNITÀ DEL PALATINO (PTI), spessore massimo 10 m, deposito da ricaduta correlabile ad una eruzione freatomagmatica dei Colli Albani (De Rita *et alii* 2002); l'UNITÀ DI PRIMA PORTA (PPT) affiorante in riva destra del Tevere, deposito piroclastico a matrice cineritica prevalente, relativo al vulcanismo del settore orientale sabatino; l' UNITÀ DI CASAL DEL CAVALIERE (KKA), affiorante in modo discontinuo sulla sponda destra dell'Aniene, deposito interpretabile come un deposito da flusso piroclastico freatomagmatico pertinente all'attività albana; i TUFI STRATIFICATI VARICOLORI DI SACROFANO (SKF), depositi di ricaduta ricche in pomici, che sono presenti su tutto il territorio del comune di Roma, e che mantellano la topografia sottostante con spessori fino a 14 m, interpretabile come prodotto di eruzione esplosiva dei centri vulcanici sabatini.

I depositi vulcanici del sintema di Villa Glori sono fortemente incisi da una superficie ad alto rilievo, posta a circa 0 m slm (da dati di sondaggio) e che ospita i depositi vulcanici e sinvulcanici del sistema Torrino (TNO). Alla base del sistema si riconosce lungo il fosso dell'Acquacetosa, un piccolo affioramenti di lave, dette LAVE DI VALLERANO (LLL). Lungo l'Aniene, al di sopra della superficie di incisione si trovano i depositi delle POZZOLANE ROSSE (RED), riferibili all'eruzione ignimbritica centrale di grande volume dei Colli Albani. Nel settore sud di Roma, tra la Magliana, Fosso Galeria e Torrino, alla base, insieme ai depositi di RED, si rinvengono ghiaie, sabbie e limi poligenici in facies fluviale, con elementi vulcanici, denominate nel complesso FORMAZIONE DEL FOSSO DEL TORRINO (FTR). All'interno di tale formazione è presente un deposito vulcanoclastico a granulometria sabbioso ghiaiosa, prevalentemente mal classato, costituito da scorie arrotondate gialle, da cui il nome di conglomerato giallo (FTR1). L'area di distribuzione del FTR1 corrisponde all'area distale di una conoide confinata in un'ampia depressione al tetto delle RED, localizzata nel settore NO dei Colli Albani. In riva destra alla base del sistema, soprattutto lungo la via Flaminia, affiora il TUFO ROSSO A SCORIE NERE SABATINO (RNR), un deposito piroclastico a matrice cineritica grigio violacea poco coerente. Al di sopra delle formazioni basali illustrate, si rinviene una complessa successione di materiale vulcanico, costituito da livelli pomicei e coriacei, con intercalati livelli cineritici pedogenizzati relativi all'attività Sabatina, nota come la successione dei TUFI STRATIFICATI

VARICOLORI DI LA STORTA (LTT). Un altro piccolo spandimento lavico è rappresentato dalle LAVE DI FOSSO TRE RAMI (RMN), note solo da dati di sondaggio, posto al di sopra delle POZZOLANE ROSSE con spessori di qualche metro. In modo più esteso al di sopra del LTT si ha il deposito scoriaceo delle POZZOLANE NERE (PNR), affiorante nella parte sud-orientale della città. Essa è unità piroclastica incoerente di colore grigio nerastro a geometria tabulare con spessori massimi di circa 20 m, parte dell'eruzione ignimbritica di grande volume del vulcano dei Colli Albani. Al tetto del sintema del Torrino si ha la FORMAZIONE DI FONTANA CENTOGOCCE (SLV), affiorante nella parte NE di Roma nella sua litofacies piroclastica (SLVb), relativa a delle fasi esplosive del Vulcano Laziale comprese tra la deposizione delle PNR e del Tufo Lionato (descritto in seguito).

Anche al tetto del sintema Torrino si riconosce una superficie di erosione che costituisce la base del sintema Quartaccio (QTA), all'interno della quale si mette in posto la FORMAZIONE DI VILLA SENNI (VSN). Tale superficie varia fortemente con la paleogeografia.

La FORMAZIONE DI VILLA SENNI raccoglie due unità ignimbritiche, le più conosciute in quanto hanno fornito materiale da costruzione sin dall'epoca romana. Tali depositi affiorano diffusamente in riva sinistra del Tevere e dell'Aniene, costituendo una parte fondamentale del plateau ignimbritico dei Colli Albani, con alcuni lembi sulle rive destre. I prodotti sono riferibili all'ultima eruzione ignimbritica di grande volume dei Colli Albani e sono : (1) il TUFO LIONAto (VSN 1), deposito massivo e caotico mal stratificato, litoide per zeolitizzazione; (2) le POZZOLANELLE (VSN2), deposito caotico massivo, da incoerente a litoide, avente due *litofacies* tipiche (VSN2a Occhio di Pesce, per il caratteristico aspetto punteggiato bianco, per la ricchezza di cristalli di leucite; VSN2b Breccia di Colle Fumone, breccia di natura co-ignimbritica). Esiste inoltre una litofacies ghiaioso sabbiosa (VSNa) generalmente a stratificazione incrociata, intercalata a livelli sabbiosi massivi, in facies fluviale e da flusso iperconcentrato, costituiti interamente da scorie nere e rosse, liti olocristallini e lavici, cristalli di leucite in parte analcimizzati e di clinopirosseni e granati, dovuto al rimaneggiamento di VSN1 e VSN2.

Una fase erosiva minore permette la deposizione al di sopra delle unità vulcaniche della Formazione di Villa Senni, del deposito costituito da ghiaie e sabbie quarzose ricche in cristalli di pirosseno ed analcime, a laminazione incrociate a basso angolo, con clasti di Tufo Lionato, che passa verso l'alto a limi argillosi avana grigiastri con frustoli vegetali, analcime, concrezioni calcaree e manganesifere. Tale formazione, pedogenizzata al tetto, è nota come la FORMAZIONE AURELIA (AEL). In questo momento si ha la messa in posto dei

depositi relativi all'attività del vulcano delle Faete successiva alla eruzione dell'unità del Villa Senni. I depositi sono quelli della FORMAZIONE DI MODANA DEGLI ANGELI (FKB), lunghe colate di lave (FKBa, *litofacies* lavica) e subordinati livelli di piroclastiti (FKBb, *litofacies* piroclastica). Si sedimenta successivamente la Formazione di Vitinia (VTN), caratterizzata dal basso verso l'alto da conglomerati, sabbie e limi, depostasi verosimilmente durante la risalita secondaria del livello marino a circa 280 ka (Giordano *et alii* 2002b). Al tetto della VTN si rinviene abbondante materiale vulcanoclastico dovuto all'attività contemporanea del vulcano delle Faete. All'interno dell'unità si rinvengo anche le pomici dell'UNITÀ DELLA VIA NOMENTANA (NMT). Questa ultima unità vulcanica, di provenienza Sabatina, chiude il sistema Quartuccio ed è alla base del sistema Fiume Aniene (ANE).

La superficie di base del sintema ANE e molto prossima alla topografia odierna. L' Unità di Saccopastore (SKP) rappresenta i depositi di questo sistema, ghiaie e sabbie fluviali ad elementi vulcanici molto ricchi in leucite analcimizzata, a laminazione incrociata, limi argillosi con gasteropodi salmastri, in giacitura di terrazzo fluviale.

Il sistema relativo alle fasi erosive dell'ultimo glaciale è quello del Fiume Tevere (SFT), che ospita i DEPOSITI ALLUVIONALI del Tevere e dell'Aniene, così come quelli dei loro tributari, depostisi in larga parte durante l'Olocene (SFTba) ed ancora in sedimentazione (SFTbb). La quota della superficie erosiva wurmiana, nota da dati di sondaggio, va olte i -40 m slm (Funiciello *et alii* 2005). Si riconosce ancora un'attività vulcanica secondaria che nel settore SE della città dà luogo a depositi vulcanoclastici tipo *maar* e freatomagmatici di Albano. In particolare si mettono in posto l' UNITÀ DELLA VALLE MARCIANA (MAK), riferibile all'eruzione freatomagmatica con meccanismi di deposizione da ricaduta e colata piroclastica del *maar* di Valle Marciana e depositi associati da *lahar*.

Nel Pleistocene superiore si ha, infine, la messa in posto del PEPERINO DI ALBANO (MNN), confinato in paleovalli e ampiamente cavato a scopo edilizio.

6.3.4 UNITÀ ALLUVIONALI E DEPOSITI RECENTI

Tra il Pleistocene Superiore e l'Olocene, il principale agente morfogenetico è costituito dall'azione fluviale di alluvionamento determinato dal progressivo innalzamento del livello del mare in seguito alla fese calda interglaciale. Dal punto di vista morfologico si hanno altri due fattori importanti: uno relativo a processi vulcanici secondari (maar di Albano) e l'altro connesso alla attività antropica (attività estrattiva, tombamento dei paleoalvei, ecc).

Riguardo i processi vulcanici ancora attivi nell'Eneolitico, ne è testimonianza la FORMAZIONE DEL TAVOLATO (TAL), non affiorante ma ben ricostruibile attraverso il modello digitale del terreno (Fig. 47), complessa successione di depositi fluviali e di *lahar*, questi ultimi riferibili ad eventi di esondazione del lago Albano, correlato alla forte attività di degassamento che ha prodotto numerosi episodi di innalzamento del livello del lago.

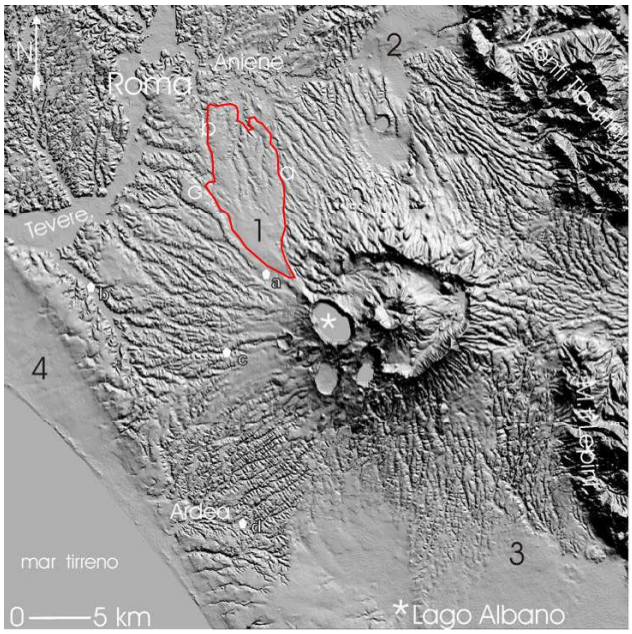


Figura 47: Modello digitale del terreno (DEM), a 20 m; delimitato in rosso il deposito da *lahar* della formazione del Tavolato che costituisce la Piana di Ciampino (1); sono indicati con a) b) e c) rispettivamente Fosso Giardino dell'Incastro, Fosso dell'Acqua Bulicante e colata di Capo di Bove; (2) Piana di Castiglione-Bagni di Tivoli; (3) piana Pontina; (4) piana del Tevere.

In ultimo si sono considerati i DEPOSITI ANTROPICI (h) in genere e i depositi di risulta della cave (h1). Essi costituiscono dal punto di vista stratigrafico una formazione molto complessa ed eterogenea, cartografabile con una certa continuità nell'area del centro storico della città, dove duemila anni di presenza umana (rifiuti, incendi, costruzioni, demolizioni, ecc) hanno accumulato spessori di materiale per oltre 10 m in diversi punti della città. Tali depositi coprono le formazioni geologiche sottostanti e costituiscono i depositi più recenti dell'area.

7. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO ED IDROGEOLOGICO

L'area romana si trova nella zona distale dei *plateau* ignimbritici dei Colli Albani a sud e dei Monti Sabatini a nord, compresa tra l'Appennino centrale ed il Mar Tirreno (Fig. 48). La valle del fiume Tevere e quelle dei suoi tributari di cui il principale è l'Aniene, costituiscono il motivo morfologico dominante dell'area.

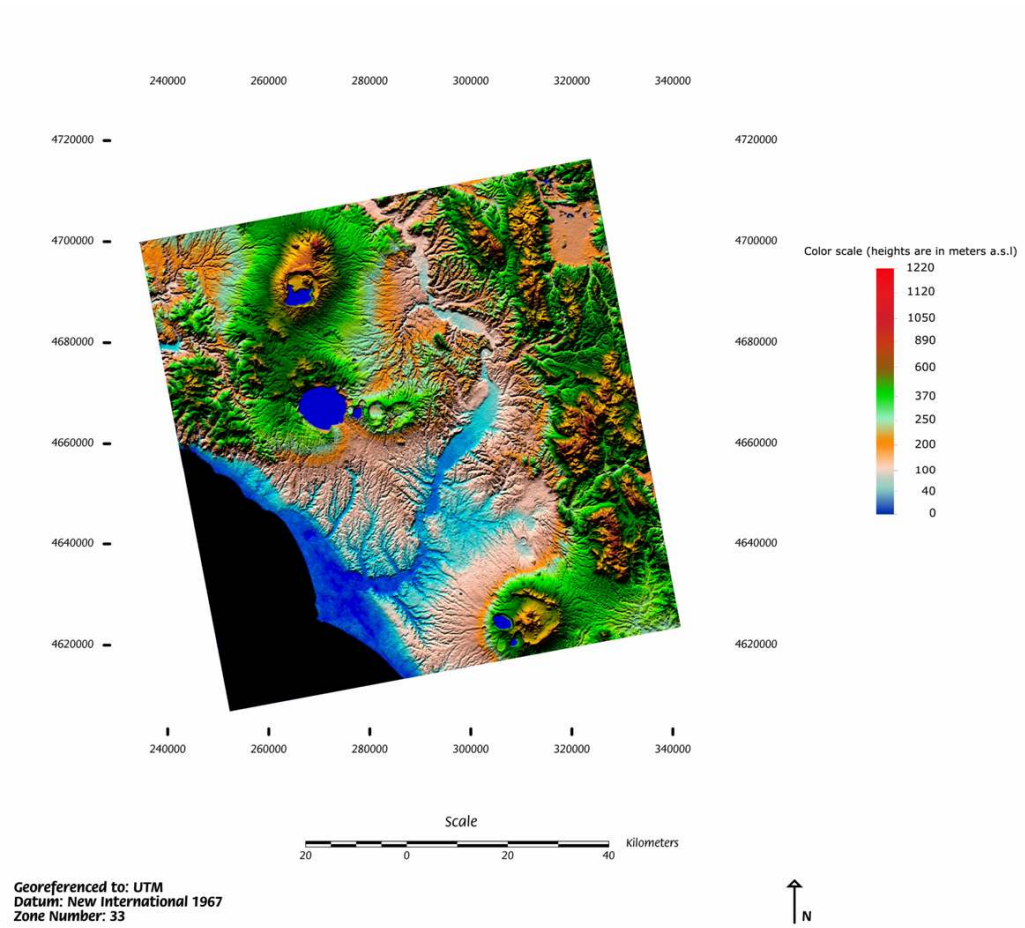


Figura 48: Modello digitale dell'elevazione del terreno (DEM) dell'area romana. Si riconoscono i rilievi vulcanici con i laghi craterici e l'elemento morfologico del Fiume Tevere.

Sul modellamento geomorfologico dell'area, oltre ai fattori vulcanici locali e la tettonica regionale, hanno inciso fortemente eventi di portata globale quali come i cambiamenti climatici che hanno determinato le oscillazioni eustatiche del livello del mare. Infatti nel corso del Pleistocene medio superiore il contributo della tettonica e del vulcanismo diventano agenti morfogenetici secondari per intensità rispetto all'azione fluviale che domina con cicli di erosione-sedimentazione, in funzione delle variazioni del livello di base.

Nell'area romana è evidente una dicotomia morfologica che rispecchia i motivi strutturali principali. In riva destra l'elemento morfologico dominante è l'alto di Monte Mario che determina una elevazione media del settore occidentale maggiore di quella orientale. Il versante orientale dell'alto è acclive e relativamente regolare, sostenuto dalle argille sovraconsolidate della formazione di Monte Vaticano. I fossi tributari del Tevere, Fosso dell'Acquatraversa e della Crescenza, in questo settore presentano un andamento rettilineo NO-SE, parallelo alla faglia bordiera principale dell'alto. Il versante occidentale dell'alto è invece dominato da direttrici N-S e NE-SO, dove il reticolo fluviale secondario si imposta sulle litofacies della formazione di Ponte Galeria, con un andamento dendritico e ben sviluppato. Il drenaggio del settore è prevalentemente verso i quadranti meridionali ed è parte del reticolo radiale dei Monti Sabatini.

In riva sinistra la morfologia risulta in genere addolcita e regolare, con basse pendenze. Il reticolo idrografico secondario, costituito dai fossi in sinistra idrografica, si sviluppa erodendo le unità piroclastiche dei Colli Albani. Le caratteristiche di elevata permeabilità ed erodibilità delle unità pozzolanacee albane, favoriscono l'incisione di u reticolo dendritico ben organizzato. Dal punto di vista morfologico, il settore orientale si presenta con rilievi collinari, caratterizzati da creste ampie e sub-pianeggianti che si raccordano con i fondovalle o con pendii dolci dove i materiali sono poco litoidi o teneri (per esempio materiali pozzolanacei), o con scarpate e pendii ripidi dove sono interessati terreni lapidei (per esempio materiali tufacei litoidi, lave). I fondovalle sono tipicamente piatti per la presenza dei depositi alluvionali olocenici che colmano il reticolo inciso con grande efficacia durante l'ultimo glaciale (Würm). Il drenaggio di questo settore è verso i quadranti settentrionali ed è parte del reticolo radiale dei Colli Albani.

Nell'area orientale si distingue l'area meridionale occupata dalla piana di Ciampino. I profili topografici che attraversano la piana rivelano una minore maturità morfologica rispetto al resto dell'area. La piana è caratterizzata da un basso contrasto morfologico con un reticolo idrografico diffuso. La piana come è stato messo più volte in evidenza nel corso della trattazione geologica precedente, è correlata ai depositi di *lahar* della formazione del Tavolato che hanno sovralluvionato il reticolo würmiano, completamente obliterato. I depositi della Formazione del Tavolato risultano nuovamente reincisi all'altezza delle porte di Roma dove i fossi dello Statuario, dell'Acqua Mariana, di Torrespaccata, di S. Maura e del Giardino dell'Incastro interrompono l'aspetto morfologico della piana.

7.1 CENNI SULL'ASSETTO IDROGEOLOGICO

Per quanto riguarda l'assetto idrogeologico del territorio del Comune di Roma, esso è condizionato dalla presenza di distinti ambiti geologico-stratigrafici, che determinano l'esistenza di più unità idrogeologiche:

- Unità Idrogeologica dei Monti Sabatini;
- Unità Idrogeologica dei Colli Albani;
- Unità Idrogeologica di Ponte Galeria;
- Unità Idrogeologica delle piane alluvionali;
- Unità Idrogeologica del delta del Fiume Tevere.

Nelle diverse unità sono presenti molteplici acquiferi, la cui circolazione complessa tende a raccordarsi a ridosso delle quote corrispondenti ai livelli di base fondamentali costituiti dai fiumi Tevere, Aniene e dal mare. Il limite idrogeologico inferiore di queste idrostrutture è rappresentato dalle argille plioceniche della formazione del Monte Vaticano, che ne costituiscono l'*aquiclude*, e sono abbondantemente ricaricate anche da aree esterne all'ambito comunale. La superficie dell'*aquiclude*, ossia il tetto delle argille vaticane, risulta fortemente articolato in seguito ai processi morfostrutturali responsabili del modellamento del paesaggio in epoca pre-vulcanica e molto condizionato dalle fasi di basso stazionamento del livello del mare (massima capacità erosiva fluviale). Nell'area sono presenti sorgenti e manifestazioni gassose legate a fenomeni di risalita di fluidi gassosi profondi lungo le discontinuità tettoniche, provenienti da *reservoir* geotermici.

1. Unità Idrogeologica dei Monti Sabatini

   Caratterizza il settore in riva destra del Tevere, laddove l'alto di Monte Mario, costituito da rocce a bassa permeabilità, indirizza il flusso delle acque sotterranee, alimentato dagli acquiferi sabatini verso i fossi dell'Acqua Traversa, della Mola e della Torraccia e sostenuto nella portata da numerose sorgenti di subalveo. Il regime dei Fossi Galeria, Magliana e dell'Arrone sono invece alimentati in minima parte dai complessi sabatini, drenando le acque degli acquiferi sabbioso-ghiaiosi appartenenti alla formazione di Ponte Galeria.

2. Unità Idrogeologica dei Colli Albani

   E' proprio del settore in riva sinistra su cui il comune di Roma si estende ampiamente. Il substrato argilloso pre-vulcanico in questo settore si trova piuttosto depresso e gli acquiferi vulcanici risultano di spessore elevato (Funiciello & Giordano 2005; Corazza

et alii 2006). Il drenaggio è ripartito tra il fiume Tevere ed il suo più importante affluente, l'Aniene, controllata dal proseguimento verso SE dell'alto strutturale di Monte Mario, attraverso i Colli Parioli, il Pincio fino alla zona di Ciampino. La falda regionale albana alimenta numerosi corsi d'acqua perenni dell'area romana, tra cui si ricordano i fossi di Malafede, Valleranno, Caffarella, come affluenti del Tevere e Tor Sapienza ed Osa, tributari dell'Aniene. Considerando i contributi delle sorgenti subaeree e di quelle di subalveo, viene stimato che i Colli Albani cedano ai due fiumi approssimativamente 3 m^3/s all'anno (Boni *et alii* 1998, Capelli *et alii* 2001).

3. Unità Idrogeologica di Ponte Galeria

Tale unità, estesa per 100 km^2 nel territorio romano (Capelli & Mazza 2008) ospita due acquiferi principali: uno a falda libera legato al deposito delle ghiaie superiori, e l'altra confinata proprio del livello delle ghiaie inferiori. Il continuo sfruttamento dei depositi conglomeratici e sabbiosi, in particolare nell'area di Ponte Galeria, in seguito a più di quarant'anni di coltivazione di cave, ha determinato la perdita di centinaia di milioni di mc di materiale solido e con essi anche della falda (Capelli *et alii* 1999).

4. Unità Idrogeologica delle piane alluvionali

E' definito dall'acquifero basale delle ghiaie della serie alluvionale olocenica del fiume Tevere e del suo affluente l'Aniene. Esso ospita un importante falda confinata (Ventriglia 1971, 1990, 2002, Corazza *et alii* 1999) caratterizzata da una notevole continuità spaziale, in cui le numerose captazioni in regime di magra contribuiscono a diminuire la portata di tali fiumi e ad aumentare le possibilità di inquinamento degli acquiferi.

5. Unità Idrogeologica del delta del Fiume Tevere

Corrisponde all'area del delta tiberino, emerso per circa 150 km^2 e con spessore massimo del corpo deltizio di 80 metri (Capelli *et alii* 2002, 2005). Ospita un acquifero multistrato dovuto alla sua complessa struttura che determina diversi ambienti di sedimentazione: barriere, lagune, facies eoliche, colmate di bonifica ecc. Di tali corpi idrici si conosce ben poco, ma campagne di rilevamenti effettuati nella piana costiera mettono in evidenza importanti bassi piezometrici che innescano fenomeni di intrusione salina (Capelli *et alii* 2002, 2005).

In linea generale dallo studio dell'andamento delle linee isofreatiche, si deduce la circolazione idrica sotterranea alimenti fortemente il reticolo idrografico, naturale ed

artificiale dell'area comunale di Roma. La circolazione idrica sotterranea è condizionata sostanzialmente da 1) il motivo strutturale ads andamento NO-SE che ripartisce il drenaggio sotterraneo proveniente dai settori centrali dei distretti sabatino ed albano e 2) le depressioni vallive del Tevere attuale e del Paleotevere, colmate dai relativi depositi. La potenzialità degli acquiferi in riva sinistra è di molto superiore quelli in riva destra ed in particolare la falda albana penetra profondamente nel tessuto urbano storico della città di Roma, tanto che essa alimentava in tempi passati alcune aree umide ai piedi dei sette colli (le cosiddette marrane) e numerose sorgenti.

L'assetto idrogeologico in ambiente urbano è parzialmente turbato dalle opere antropiche, in particolare da rilevati in terra, da scavi importanti quali gallerie, l'impermeabilizzazione e la perdita di acque chiare o liquami dalle infrastrutture sotterranee. Di tale articolata e complessa componente antropica occorre tenere conto per ulteriori interventi sul territorio e la comprensione dell'insorgere di alcune problematiche specifiche, quali i dissesti per crollo di cavità ipogee.

8. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO-TECNICA DELLE PRINCIPALI UNITÀ LITOTECNICHE

Numerosissime sono state le campagne di indagini geognostiche effettuate su Roma legate alla progettazione e realizzazione di opere di notevole rilevanza in ambito comunale quali le linee metropolitane, le ferrovie, il consolidamento di edifici storici e l'analisi di molteplici pericolosità geologiche a cui la città è soggetta. Rispetto alla descrizione e suddivisione stratigrafica illustrata precedentemente, spesso a causa della mancanza di elementi geologici certi di correlazione, sui dati geotecnici pesano incertezze nell'attribuzione formale alle unità della Nuova Cartografia del Comune di Roma (Funiciello & Giordano 2008).

Nei paragrafi seguenti vengono sintetizzate le caratteristiche geotecniche del substrato sedimentario pre-vulcanico, dei depositi vulcanici ed alluvionali dell'area romana, fornendo in modo un quadro di riferimento essenziale e speditivo per le diverse unità litotecniche fondamentali. Il primo approccio sistematico alla caratterizzazione geotecnica dei terreni costituenti il sottosuolo della città di Roma è fornita da Ventriglia (1971). Nel 2002 la banca dati di dati geotecnici presentata da questo autore viene significativamente ampliata secondo la medesima impostazione geologica. E' importante puntualizzare che la rappresentatività di un parametro geotecnico puntuale dipende da diverse condizioni, quali l'omogeneità della formazione indagata. Perciò nell'estrapolazione di un dato puntuale si deve necessariamente tenere conto dell'omogeneità/eterogeneità del deposito, della presenza di anisotropie primarie e secondarie quali stratificazioni e fratture, della storia geologica propria del sito di prelievo, fattori che possono variare sensibilmente in funzione dell'ubicazione.

8.1 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DELLE UNITÀ PRE-VULCANICHE

Riguardo al substrato sedimentario pre-vulcanico si illustrano sinteticamente le caratteristiche geologico tecniche relative alla Formazione del Monte Vaticano (MVA).

La formazione di Monte Vaticano è costituito prevalentemente da depositi argillosi, subordinatamente argilloso limosi con livelli più sabbiosi e risulta da consolidato a sovraconsolidato, con bassi valori di compressibilità. I primi studi geotecnici vennero

avviati a partire dall'analisi delle argille di un fronte di cava presente a Piazzale degli Eroi (Spina 1958); nel 1972 Gigli descrive l'intenso stato di fratturazione di tali marne-argille azzurre. Una stima quantitativa dello stato di fratturazione di questo litotipo è stata fatta solo recentemente nel corso dello scavo della galleria "Giovanni XXIII" di Roma. Il rilievo geomeccanico eseguito ha constato un numero di discontinuità nel volume dell'ammasso compreso tra 0.9-12 discontinuità/m^3, direttamente correlabile con la sua deformabilità. Bozzano *et alii* (1995), in uno studio sul sottosuolo dell'Anfitreato Flavio, propongono una caratterizzazione delle argille vaticane con la quantificazione dello stato di sovraconsolidamento. Essi ottengono da un campione, prelevato a 44.3 m dal piano campagna, una pressione di snervamento di 2200 kPa.

Dati relativi alla velocità delle onde sismiche sono presentati nel lavoro di Beneo *et alii* (1996), mediante l'applicazione del metodo sismico a rifrazione. Nella porzione superficiale della formazione di Monte Vaticano, parzialmente alterata, si riscontrano v_p di 200-2100 m/s, laddove nella parte più intatta si ha un valore di 2200-2400 m/s. Sempre dal punto di vista sismico e della rigidezza (G), in Martino *et alii* (2004) sono disponibili dati provenienti da prova di colonna risonante e taglio torsionale ciclico che forniscono una G pari a circa 100 MPa.

Dati sulla bassa deformabilità della MVA, sono forniti da Corazza *et alii* (1999). Tali autori propongono una caratterizzazione della formazione al di sotto delle alluvioni tiberine, dove presenta coefficiente di compressibilità (cr), valutata sul tratto di ricompressione della curva edometrica pari a 0.04-0.21. Dati sulla resistenza non drenata sono presentati da Calabresi (2004), che fornice una c_u pari a circa 500kPa alla quota di scavo, riferendosi alle argille rinvenute nei lavori per una galleria ferroviaria, costruita alla fine degli anni '70, al di sotto del Gianicolo.

Relativamente alle formazioni sedimentarie pre-vulcaniche pleistoceniche sono presenti nella letteratura alcuni recenti lavori (Burghignoli *et alii* 2003, Viggiani *et alii* 2004) in cui si presentano dati geotecnici ottenuti dalle campagne geognostiche effettuate in occasione dei lavori per la costruzione della line metropolitana C.

8.2 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DELLE PRINCIPALI UNITÀ VULCANICHE

I terreni piroclastici sono rappresentati nell'area romana da litotipi molto eterogenei con una notevole differenziazione del comportamento fisico-meccanico, in funzione delle

specifiche modalità di messa in posto. Di seguito sono sinteticamente illustrati i parametri fisico-meccanici di alcuni depositi vulcanici presenti nell'area romana (Ventriglia 2002):

Piroclastici da ricaduta: depositi rappresentati da tessiture in genere lapilloso cineritiche, a granulometria decrescente in funzione della distanza dal centro vulcanico di emissione. Sono spesso soggetti a fenomeni di argillificazione e si presentano in giacitura primaria se si mettono in posto in ambito subaereo e come depositi rimaneggiati se in ambito subacqueo. Rappresentativi di queste unità sono i tufi stratificati varicolori di Sacrofano (SKF), di La Storta (LTT) e la formazione di Fontana Centogocce (SLV).

Depositi di colata piroclastica: sono i depositi maggiormente rappresentati per volume e distribuzione nell'area romana. Sono unità il cui meccanismo di messa in posto è per flusso denso di materiale piroclastico. Presentano infatti strutture di flusso ed hanno una certa coesione in funzione delle velocità di raffreddamento, di temperatura di messa in posto e di vapore acqueo contenuto. Si possono infatti presentare come materiale sciolto, pseudo-coerente se il raffreddamento e il degassamento sono rapidi, mentre coerente, litoide se i tali processi sono lenti. Esempi di materiali da colata incoerenti sono rappresentati dai depositi pozzolanacei delle Pozzolane Rosse (RED) e delle Pozzolanelle (VSN2), dove la coesione apparente è data dalle forze intergranulari e dall'elevato incastro tra i granuli. Materiale piroclastico da colata litoide è rappresentato dal Tufo Lionato (VSN1), dal Tufo a Scorie Nere Sabatino (RNR), dove per effetto del processo di zeolitizzazione, si ha la cementazione dell'ammasso.

Vulcaniti litoidi: sono rappresentate dalle colate laviche che hanno un comportamento geomeccanico lapideo come le Lave di Valleranno (LLL) o la formazione di Madonna degli Angeli (FKBa).

Nella Tabella 10 si propongono alcune valori indicativi delle caratteristiche geotecniche di prodotti vulcanici dell'area romana, presentati da Ventriglia (2002). La difficoltà maggiore nella determinazione delle proprietà meccaniche di tali materiali è l'impossibilità in molti casi di prelevare campioni di materiale indisturbato, soprattutto per i livelli pozzolanacei.
I maggiori apporti alla definizione del comportamento dei terreni piroclastici sono legati alle valutazioni di stabilità di ipogei diffusi nell'area urbana di Roma, con riferimento specifico a cave in sotterraneo scavate in litotipi pozzolanacei. Significativo è il contributo di Bernabini et alii (1966) a partire da un lavoro su una estesa rete caveale nell'area delle Tre Fontane, dove presenta risultati sull'unità delle Pozzolane Rosse.

UNITÀ VULCANICA	*Pozzolanelle VSN2*	*Tufo Lionato VSN1*	*Pozzolane nere PNR*	*Pozzolane rosse RED*
Peso di volume – **γ** (kN/m^3)	15-16.9	15.5-16.5	13.4	15.6-19
Umidità naturale – **Wn** (%)	28-40	--	10.7	35-40
Angolo di attrito – **φ'** (°)	22-44	--	--	25-36
Coesione drenata – **C'** (kPa)	0-40	--	--	0-40
Resistenza alla compressione monoassiale – (MPa)	--	2-3.5 (1) 11.5-13 (2)	--	0.13-0.19

Tabella 10: Intervallo di variabilità dei parametri fisico-meccanici di alcune unità vulcaniche dell'area romana (da Ventriglia 2002); (1) indica i valori di resistenza alla compressione monoassiale dopo saturazione in acqua per 90 gg, mentre (2) dopo essiccamento a 50°.

COLATA LAVICA	*Acuacetaosa*	*Vallerano*	*Capo do Bove*
Peso di volume – **γ** (kN/m^3)	27-28	27.5	26.7
Resistenza alla compressione monoassiale – (MPa)	170-223	241.8-320	220-310

Tabella 11: Intervallo di variabilità dei parametri fisico-meccanici di alcune colate laviche dell'area romana (da Ventriglia 2002)

8.3 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DELLE ALLUVIONI OLOCENICHE

Le informazioni sulle caratteristiche fisico-meccaniche delle alluvioni tiberine e dei suoi tributari sono dovute a studi geologici, geotecnici ed idrogeologici locali, correlati a problematiche di dissesto e/o in occasione di progettazione di infrastrutture (i.e. metropolitane, gallerie, ecc). Nei paragrafi seguenti si descrivono i caratteri geologico stratigrafici e geotecnici, salienti delle alluvioni del Tevere e di quelle dei suoi affluenti minori.

8.3.1 Depositi alluvionali della valle del Tevere

Il lavoro di riferimento nell'ambito della caratterizzazione geologica tecnica dei depositi alluvionali del Tevere è il lavoro di Corazza *et alii* (1999).

Attraverso lo studio di centinaia di sondaggi nell'area del centro storico, Corazza *et alii* (1999) individuano una serie di litotipi limo argillosi, sabbiosi e sabbioso limosi con frequenti eteropie di facies laterali e verticali, legate a molteplice dinamiche fluviali e alla tipologia ed entità degli apporti dei sedimenti da parte dei fossi minori confluenti nella valle. In ambito urbano lo spessore di queste alluvioni varia da 40-45 m a N, ai 45-50 nel settore centrale, fino a 65-70 m a S. Essi ricostruiscono una sezione litostratigrafica trasversale nel settore del centro storico di Roma (Fig. 49) dell'intero spessore dei depositi olocenici, individuando i seguenti litotipi, dal basso verso l'alto:

1) uno strato di base ghiaioso sabbioso (G) dello spessore costante di circa 6-8 m;
2) un livello inferiore di argille limose e limi argillosi grigiastri (AG1, AG2), presenti con continuità lungo la riva sinistra, mentre nella riva destra sono eteropici ad un deposito sabbioso limoso grigiastro (SLG);
3) un livello intermedio costituito da sabbie medio-grossolane e localmente medio fini grigiastre (S);
4) un livello superiore di limi argillosi ed argille limose marrone e verdastre (LAV) in sinistra idrografica passano a sabbie limose e limi sabbiosi grigio verdastri (SLV).
5) Infine tutta la serie risulta omogeneamente coperta da uno strato costante di circa 10 m di materiale da riporto (TA).

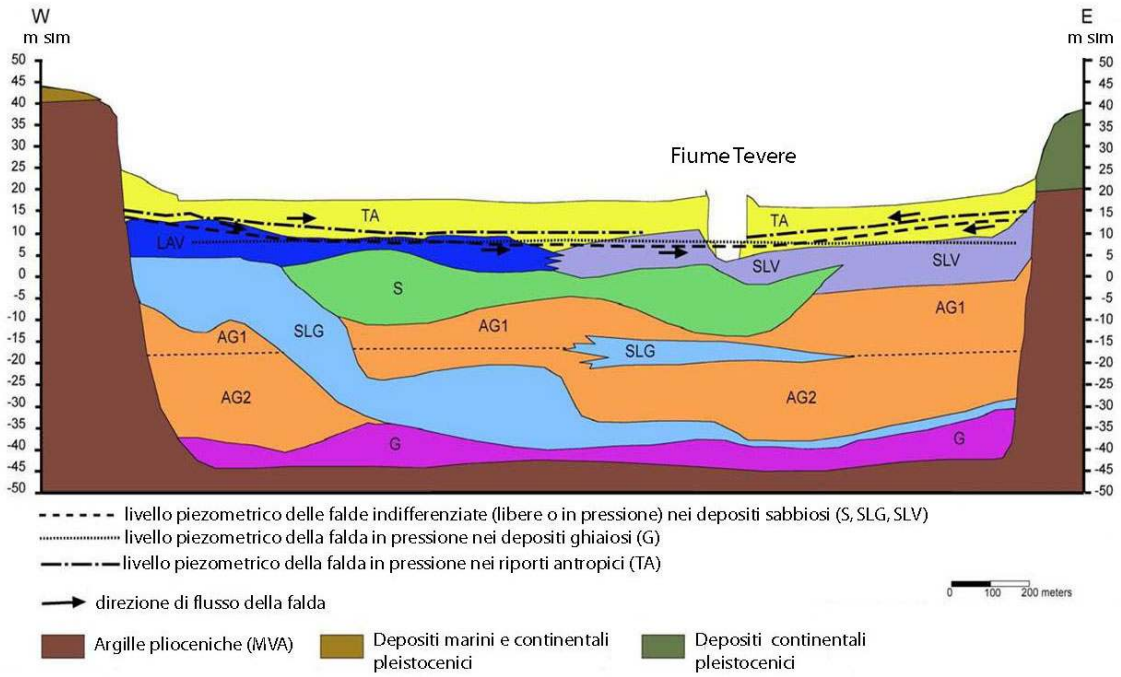


Figura 49: Sezione geologica –geotecnica tipo attraverso le alluvioni del Tevere (da Corazza *et alii* 1999). Per le sigle dei depositi alluvionali vedi testo.

Sulla base di una notevole mole di dati geotecnici di laboratorio ed in situ, i medesimi autori ne hanno definito i principali parametri fisico-meccanici delle varie unità litotecniche sopra descritte (Tabella 12).

UNITÀ LITOTECNICA	*LSO*	*LAV*	*SLV*	*S*	*AG1/AG2*	*SLG*
Peso di volume – **γ** (kN/m^3)	17-19	18-20	17-20	17-20	15-20	18.5-20
Umidità naturale – **Wn** (%)	30-45	20-30	20-40	20-30	20-60	20-30
Angolo di attrito – **φ'** (°)	25-30	18-25	27-35	30-40	15-26	25-35
Coesione drenata – **C'** (kPa)	0-20	15-30	0-20	0-10	5-25	0-15
Modulo di deformabilità – **E/Eed** (MPa)	6-14	3-14	10-20	15-31	3-12	8-14
Coefficiente di permeabilità – **k** (m/s)	10^{-6}-10^{-8}	10^{-7}-10^{-10}	10^{-6}	10^{-4}-10^{-6}	10^{-8}-10^{-10}	10^{-6}-10^{-8}

Tabella 12: Principali parametri fisico-meccanici delle alluvioni oloceniche del Fiume Tevere nell'area del centro storico della Capitale (da Corazza *et alii* 1999); LSO si riferisce al litotipo che caratterizza le alluvioni dei fossi in sinistra.

Nell'ambito delle alluvioni tiberine, in particolare nel settore del centro storico, non sono presenti strati organici di spessore significativo, ma si segnalano livelli organici nerastri di spessori da millimetriche a centimetriche che indicano l'assenza di estese deposizioni in ambiente palustre, al contrario di ciò che è riconoscibile nei fossi di riva sinistra. Nel settore del centro storico i depositi alluvionale nel complesso sono caratterizzati da uno stato sostanzialmente normal-consolidato, bassi valori di resistenza al taglio e medio-elevata deformabilità. Tali caratteristiche determinano un comportamento geotecnico piuttosto scadente, determinando problemi fondazionali, di stabilità ed interazione co le infrastrutture sotterranee e, non ultimo fenomeni di amplificazione sismica non trascurabili.

8.3.2 Depositi alluvionale dei Fossi

Nella valle tiberina confluiscono una serie di valli minori percorse da fossi che presentano un diversa sedimentazione in funzione della posizione geografica. Si

distinguono infatti una significativa variabilità dalle litologie presenti nei fossi in sinistra ed in destra idrografica.

I depositi dei fossi in destra idrografica sono costituiti essenzialmente da limi argillosi mediamente consistenti, da sabbie giallastre e ghiaie, prodotte dall'erosione dei depositi essenzialmente sabbioso ghiaiosi della formazione di Monte Mario e di Ponte Galeria, e, subordinatamente, dei depositi vulcanici primari pertinenti alle eruzioni del Distretto Sabatino.

Le alluvioni dei fossi in riva sinistra sono costituite, invece, prevalentemente da limi argillosi più o meno sabbiosi, ricche in sostanza organica, con abbondante apporto di materiale vulcanoclastico. Sono depositi molto compressibili e derivano dall'erosione dei depositi piroclastici del plateau formato dalle eruzioni dei Colli Albani e di depositi secondari associati all'attività vulcanica (i.e. *lahar*)

Campolunghi *et alii* (2004, 2008) propongono una sintesi e confronto dei depositi di alcuni fossi in riva sinistra (Fosso della Caffarella, Fosso di Grotta Perfetta, della Cecchignola, di valleranno, ecc) ed in riva destra (Fosso dei Tiradiavoli, Valle dell'Inferno, di Papa Leone, dell'Affogalasino, della Crescenza, della Maglianella e del Gelsomino) confermando le differenti caratteristiche litostratigrafiche e geotecniche.

9. CASE HISTORIES

Nell'applicazione della banca dati territoriale proposta si è affrontato lo studio geologico-stratigrafico e geotecnico sismico di aree in cui la pericolosità geologica è associata ai depositi alluvionali di fosso. Lo scopo dei *case histories* presentati è quello di esemplificare in che modo la banca dati territoriale presentata (Capitolo 4) può contribuire allo studio di pericolosità geologica, fornendo in modo semplice e completo i dati necessari alla caratterizzazione geologico-geotecnica di un volume finito di territorio. La trattazione mette in luce quali sono le informazioni specifiche che è possibile considerare grazie alla banca dati e veengono affrontati gli aspetti relativi alla pericolosità geotecnica sismica.

Nei capitoli seguenti si illustrano due casi esemplificativi delle condizioni geologico-geotecniche dei tributari in sinistra idrografica del fiume Tevere, focalizzando l'attenzione sulla suscettibilità delle paleovalli ad ospitare fenomeni di amplificazione sismica.

1. Area di Porta Metronia - studio geologico dell'area dove lo sviluppo urbanistico degli anni '30 ha determinato il seppellimento del Fosso delle Acque Mariane e dove attualmente è previsto parte del percorso della nuova linea C della metropolitana di Roma ed una stazione (all'altezza di Largo Amba Aradam).

2. Area di via Giustiniano Imperatore – studio della risposta dinamica dei depositi alluvionali del Fosso di Grotta Perfetta, sito già largamente investigato dal punto di vista geotecnico e geologico per i problemi di cedimento dei terreni di fondazione. Il Dipartimento di Scienze Geologiche ha fatto eseguire una prova sismica in foro (di tipo *cross hole*) spinta alla profondità di 50 metri dal piano campagna al fine di attraversare la serie stratigrafica completa della paleovalle ed acquisire nuovi dati in termini di proprietà sismiche di questi terreni, propedeutici ad uno studio di risposta sismica locale.

La trattazione dei due casi ha un diverso grado di approfondimento ed è necessariamente dipendente dalla disponibilità, quantità e qualità delle informazioni geologico-stratigrafiche e geotecniche acquisite.

Si è proceduto a partire da una descrizione morfologica storica, si è poi interpretato e ricostruito la geologia e l'andamento delle principali formazioni. Infine, laddove c'erano prove in sito e/o di laboratorio specifiche, si è caratterizzato i depositi precedentemente individuati, dal punto di vista della rigidezza e della risposta a sollecitazioni di tipo ciclico-dinamico quali sono quelle prodotte da un terremoto.

9.1 IL FOSSO DELLE ACQUE MARIANE (PORTA METRONIA)

L'area di dettaglio su cui si è lavorato è l'area di Porta Metronia, situata al limite tra il I e l'XI Municipio del comune di Roma. E' un'area di circa 1.2 Km^2, compresa tra la basilica di San Giovanni in Laterano e la posterula di Porta Metronia. L'area si presenta intensamente edificata ed ospita costruzioni di diversa età, con destinazioni d'uso assai differenti (Fig. 50). L'espansione dell'edilizia residenziale venne avviata a partire dal piano regolatore di Sanjust del 1909 (Fig 52), in un'area che ancora nel 1919 era aperta campagna (Fig. 51).

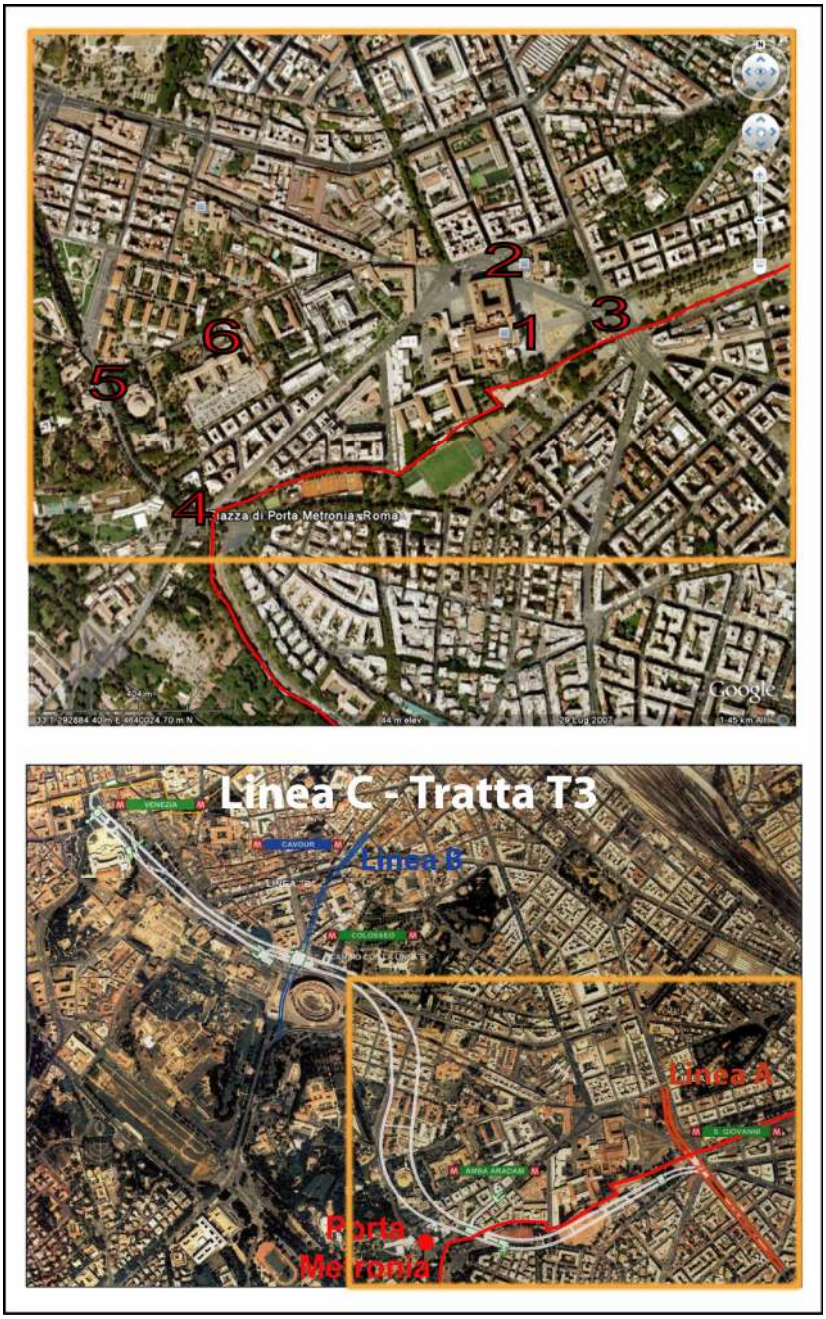


Figura 50: In alto: immagine da satellite ottenuta da Google Earth dell'area di studio. Sono indicati in rosso le Mura Aureliane e i principali manufatti storici con i numeri:
1. Basilica di San Giovanni in Laterano;
2. La Scala Santa;
3. Porta S. Giovanni- Porta Asinaria;
4. Posterula di Porta Metronia;
5. Chiesa di S. Stefano Rotondo;
6. Ospedale San Giovanni L'Addolorata;

In basso: Tratta T3 della metro C, percorso e stazioni previste.

Le Mura Aureliane, nel tratto da Porta San Giovanni a Porta Metronia, costituiscono la costruzione più antica, ma il patrimonio storico-artistico dell'area investigata comprende anche la Basilica di San Giovanni in Laterano, la Scala Santa, la chiesa di S. Stefano Rotondo ed ospita inoltre uno degli ospedali principali della città, l'Ospedale S. Giovanni l'Addolorata. Dal punto di vista della viabilità, la zona di San Giovanni - Porta Metronia è uno dei punti nevralgici della città in quanto smista il traffico del centro verso i quartieri meridionali tramite l'artiera stradale Cristoforo Colombo. Attualmente il progetto della nuova metropolitana di Roma, linea C, prevede nella tratta T3, Colosseo-San Giovanni una stazione lungo via dell'Amba Aradam, in prossimità delle Mura (Fig 52). Rispetto alle Mura Aureliane, sono stati condotti studi sull'interazione struttura-terreno (Viggiani *et alii* 2004) che hanno messo in evidenza la complessità geologica dell'area e la necessità di un approccio integrato per le problematiche di interazione.

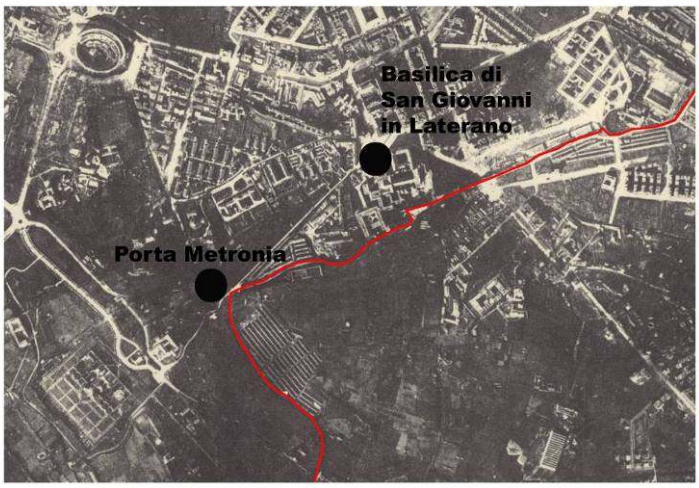


Figura 51: Stralcio del fotopiano del 1919 (scala 1:10000), prima completa ed esatta ripresa aerofotogrammetrica di Roma e il suo territorio effettuata da Umberto Nistri. In quel periodo, l'area è aperta campagna e presso Porta Metronia si possono notare gli allineamenti delle baracche.

Le Mura in questo tratto sono state inoltre lesionate durante terremoti storici, 1349, 1703, 1812, 1899, 1915 e durante questo ultimo la stessa Basilica di San Giovanni in Laterano ha subito il crollo parziale della facciata (Molin *et alii* 1995, Catalogo dei Terremoti). Tali eventi confermano la vulnerabilità dei manufatti storici e la propensione della paleovalle ad ospitare effetti locali di sito. Si è ritenuto quindi interessante condurre uno studio di caratterizzazione geotecnica sismica dei depositi del paleofossi ed una ricostruzione della geometria della valle attraverso le interpretazioni e correlazioni stratigrafiche, ottenute a partire dai dati di sondaggio e dalla cartografia geologica.

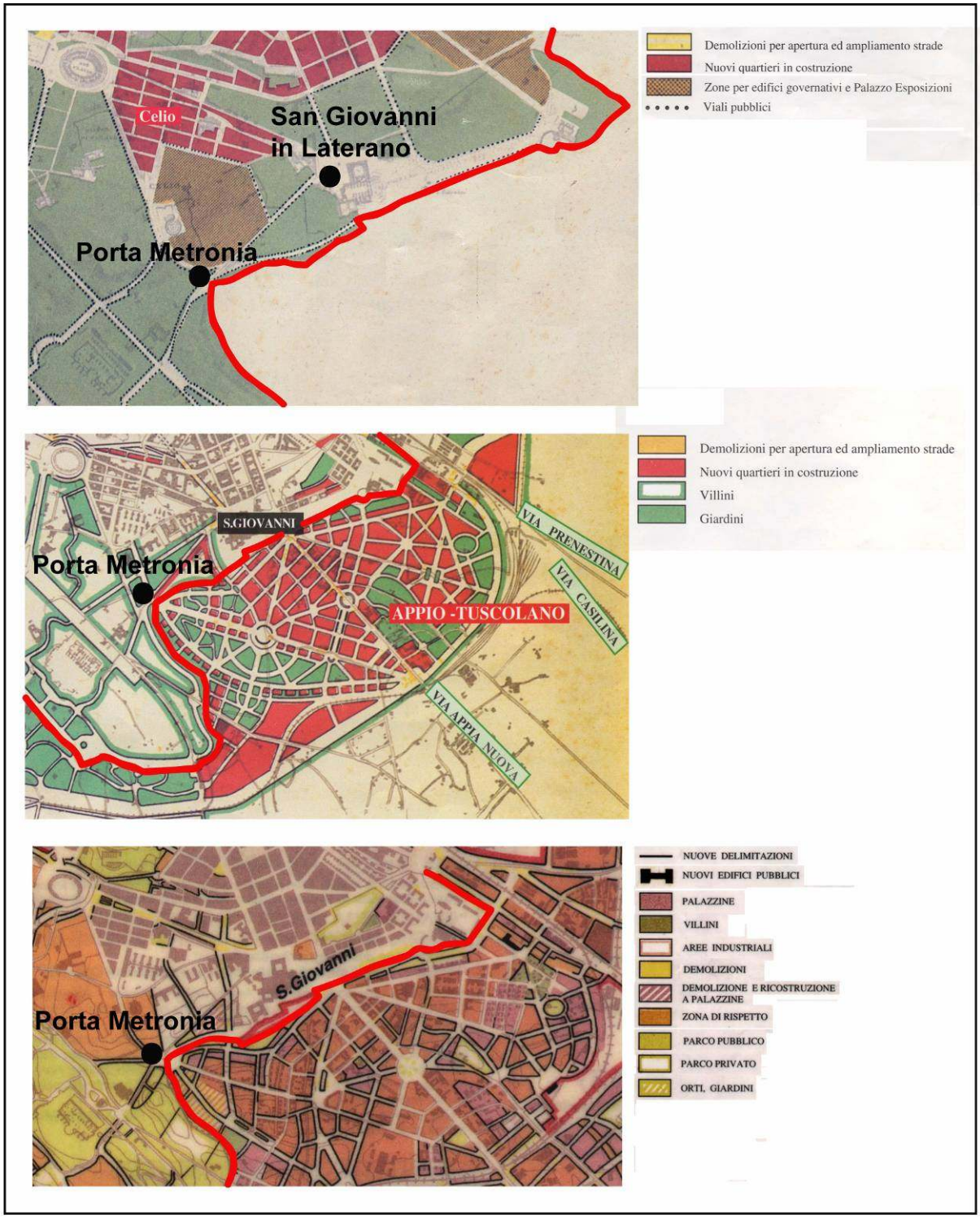


Figura 52: Stralcio dell'area di Porta Metronia dei Piani Regolatori del 1883, 1909 e 1931 (dall'alto verso il basso); in rosso sono evidenziate le Mura Aureliane. Risulta evidente come i piani regolatori del passato abbiano considerato solo l'aspetto urbanistico senza prendere in considerazione la natura geologica e morfologica del territorio su cui andavano ad operare la pianificazione..

9.1.1 Morfologia e cartografia storica

Porta Metronia è topograficamente un'area relativamente depressa, una modesta vallecola che si trova alle pendici meridionali del colle del Celio e si collega verso SO alla più ampia Valle Murcia (l'attuale via delle Terme di Caracalla). La morfologia è di tipo collinare e corrisponde solo nelle linee generali al paesaggio naturale originario. L'attuale aspetto e pendenza delle superfici è dovuto al forte controllo operato dall'uomo che come un vero e proprio agente morfogenetico ha modellato il piano di base naturale.

Attraverso la comparazione tra la cartografia storica del 1880, 1907-24 e 1934 è possibile comprendere l'evoluzione morfologica ed urbanistica dell'area e seguire le modifiche che l'uomo ha apportato al fosso delle Acque Mariane (Fig. 53). Tale fosso, o Marrana, risale al tempo di Papa Callisto II (1119-1122) che fece incanalare le acque provenienti da un corso d'acqua, originatosi dalle acque disperse da un acquedotto in rovina, che confluiva nell'Aniene. Nessuna fonte letteraria permette di risalire all'esistenza di un corso d'acqua già in età antica, ma la morfologia profondamente incisa con la tipica sezione a "V", fa presupporre che vi fosse un torrente naturale preesistente, probabilmente alimentato dalle acque meteoriche e da apporti di sorgenti locali.
Il Fosso, definito anche Marrana di San Giovanni serviva a scopo irriguo e a far lavorare due mulini ancora presenti presso Porta Metronia a partire dall'età tardo-medievale fino all'inizio del XX secolo. Il termine marrana fa presupporre che il fosso fosse soggetto ad impaludamento, tanto che nel 1601 fu causa di un'epidemia locale, scoppiata tra gli abitanti del Celio. Solo all'inizio del '900 l'area venne risanata, attraverso una bonifica che venne fatta con il materiale degli scavi archeologici delle Terme di Caracalla e che rialzò topograficamente l'area.

Nel 1880 l'area esterna alle Mura era aperta campagna e anche nella parte interna l'edificato era ridotto alla Basilica di San Giovanni in Laterano ed alla Chiesa di Santo Stefano Rotondo. Il fosso delle Acque Mariane - Marrana di San Giovanni, scorreva esternamente alle mura costeggiandole fino a Porta San Giovanni per poi deviare verso la via Appia Nuova. In questa cartografia non ci sono indicazioni topografiche esplicite, ma l'andamento morfologico del paesaggio è restituito con ombreggiature e chiari per indicare le pendenze.

Nella cartografia del 1907, aggiornata nel 1924, le indicazioni topografiche sono puntuali e descritte attraverso le curve di livello. L'area interna alle mura è a circa 30m slm e la collina del Celio si pone alla quota massima di 45m slm. La parte fuori le Mura ha una

quota massima di 35m slm con una quota media di 30m slm. Il fosso delle Acque Mariane scorre pressappoco nella stessa posizione del 1880, alle pendici della collina prospiciente la Basilica di San Giovanni, ma l'inizio dell'urbanizzazione tra Porta San Giovanni e via Appia fa si che il fosso sia seppellito dalla coltre dei riporti.

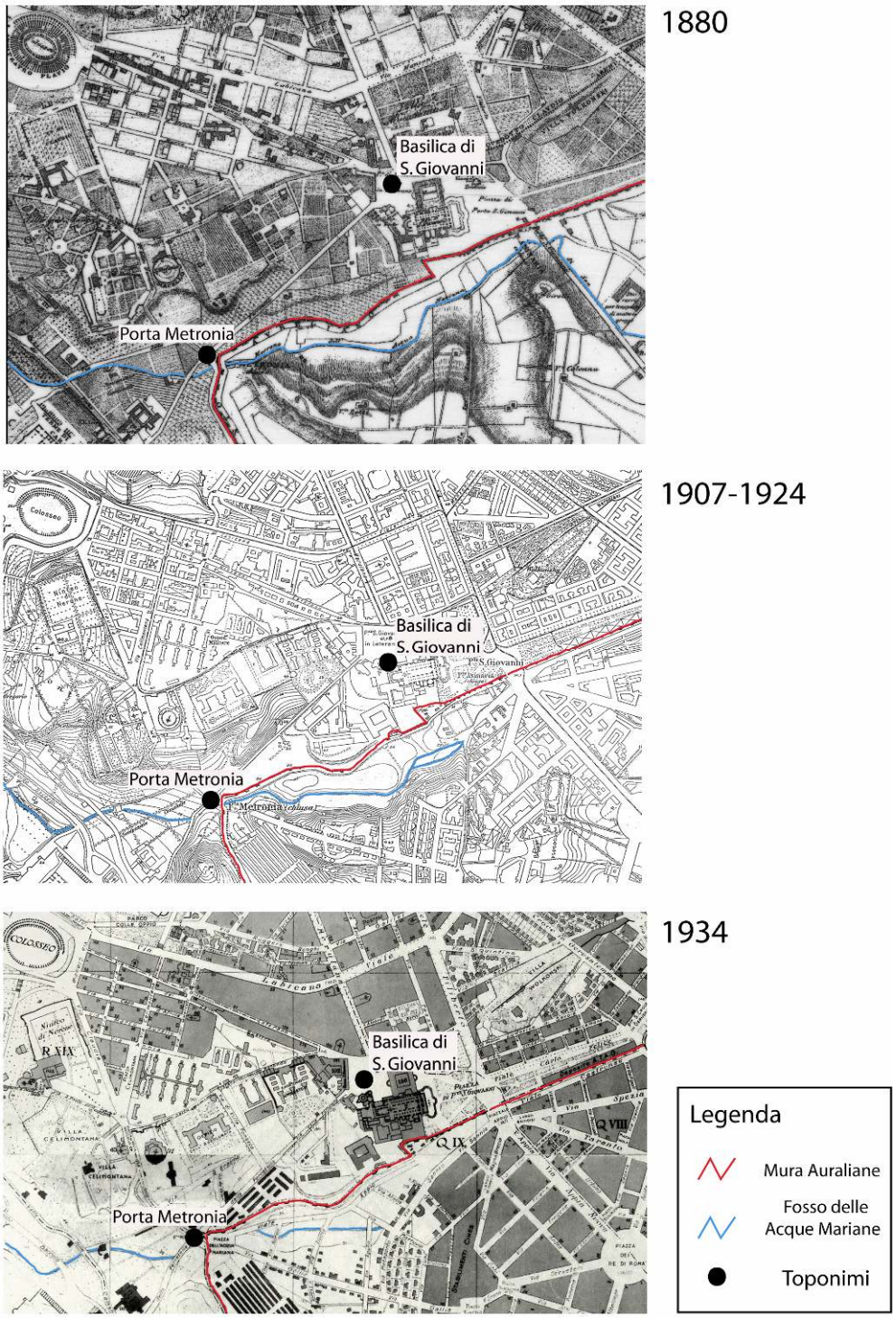


Figura 53: Dall'alto verso il basso: Pianta della Città di Roma 1880; scala 1:7680; Piano Topografico di Roma e suburbio 1907-24, scala 1:5000; Pianta della città di Roma, Marino & Gigli editori 1934, scala 1:4000.

Nel 1934 l'area edificata si espande verso Porta Metronia e la topografia varia sensibilmente. Non è più riconoscibile la collina lungo cui scorre il fosso che vede il suo percorso ridotto di circa la metà rispetto al 1880. Il corso del Fosso delle Acque Mariane, tra il 1920 ed il 1935, venne sostituito dai collettori necessari al nuovo quartiere Appio-Latino in costruzione. Attualmente il fosso non esiste più, sepolto sotto i terreni di riporto e sostituito in sotterraneo dalle condutture fognarie.
Dal confronto storico ci si rende conto delle modificazioni morfologiche apportate: (1) il percorso delle Acque Mariane è stato ridotto fino a scomparire, per far spazio alla sede stradale e agli edifici; (2) i movimenti di terra e la messa in posto dei terreni di riporto sono riconducibili ad almeno due diverse epoche storiche, antica (area interna alle Mura) e moderna (area esterna alle Mura), e sono stati effettuati per modellare la topografia al fine di renderla idonea alla costruzione di nuovi edifici e della sede stradale.

9.1.2 Informazioni del sottosuolo

Le informazioni del sottosuolo considerate nello studio dell'area di Porta Metronia sono una selezione dei dati inseriti nel *geodatabase* (Capitolo 4). Sono prevalentemente dati provenienti da sondaggi per indagini geognostiche. Sono 128 sondaggi (nel *geodatabase*, tabella **Bh**), di cui 18 acquisiti dal Progetto "Nuova Forma Urbis" (1998), 13 bibliografici relativi al Ventriglia 2002 e 97 pertinenti alle campagne geognostiche di Metro C Spa. L'informazione stratigrafica è relativa a 92 sondaggi per un totale di 681 *records* nella tabella **St**. Per quanto riguarda l'indagine geotecnica sono presenti sia prove di laboratorio sia analisi in sito, per la caratterizzazione delle principali unità riconoscibili in condizioni statiche e dinamiche. In Tabella 13, 14. si presentano i sommari di tutte le prove geotecniche che è sono state estratte per l'area di Porta Metronia (Fig. 54) dal *geodatabase*.

	Prove in situ						
	SPT	CPT	PMP	DPSH	LeFranc	CH	totale
n. prove	216	36	19	23	39	6	339
n. sondaggi	56	36	13	23	14	6	86

Tabella 13: Sommario delle prove geotecniche in sito acquisite (fonte Metro C Spa); il totale dei sondaggi su cui si sono eseguite le prove è minore della somma dei sondaggi relativi alle singole prove, evidentemente perché su alcuni sondaggi si sono eseguite le stesse prove od altre, a diverse profondità.

	Prove di laboratorio							
	EDO	TD	ELL	TX-CD	TX-CU	TX-UU	RC	totale
n. prove	36	66	26	7	10	26	4	175
n. sondaggi	15	28	14	6	8	15	4	36

Tabella 14: Sommario delle prove geotecniche di laboratorio acquisite (fonte Metro C Spa) su un totale di 120 campioni indisturbati, di cui 101 sottoposti a prove meccaniche; il totale dei sondaggi in cui sono prelevati i campioni è minore della somma dei sondaggi relativi alle singole prove, evidentemente perché su alcuni sondaggi si hanno più campioni a diverse profondità e su di essi si sono eseguite le stesse prove od altre.

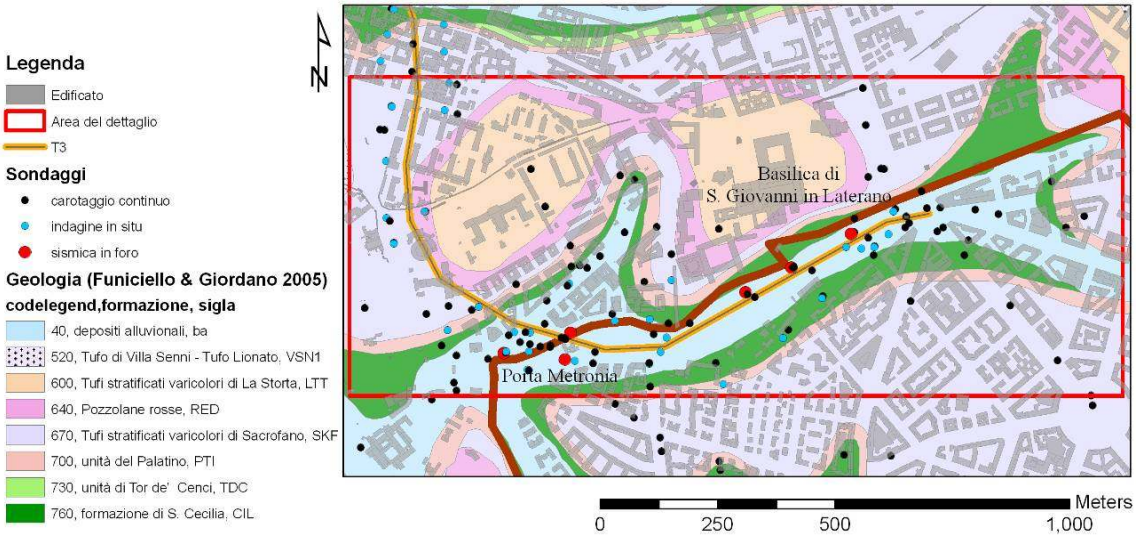


Figura 54: Carta geologica dell'area di Porta Metronia (Funiciello & Giordano 2005); vengono indicati i sondaggi inseriti nel *geodatabase* e il percorso indicativo della linea C in questa area

Prima di procedere con la descrizione dei dati stratigrafici e geotecnici è stato definito il modello digitale delle elevazioni del terreno (DEM), che costituisce in sostanza il piano alla quota relativa 0, origine delle profondità relative dei dati di sondaggio. Si è operata una scelta tra i DEMs ottenuti dall'elaborazione dei dati topografici a disposizione tramite interpolatori deterministici. I dati utili per la ricostruzione topografica sono stati i punti quotati e curve di livello relativi a Cartesia 1999 e i punti quotati relativi alla restituzione cartografica della Tratta T3 della Metro C. Per mancanza di informazioni precise sul sistema locale usato per il rilevamento dei dati relativi alla Metro C, non è stato possibile utilizzali in modo corretto, ma nel paragrafo seguente si illustra il processo di verifica del modello del terreno, senza una campagna a terra disponibile ed affidabile.

9.1.2.1 *La scelta del modello digitale del suolo*

Il modello del sottosuolo costituisce la componente altimetrica della base topografica e coincide con la quota del piano campagna a cui fanno riferimento i dati di sondaggio. Il sondaggio e qualsiasi informazione relativa ad indagini geognostiche, quali stratigrafia, campioni, prove in *situ*, sono espressi in termini di misure relative al piano campagna. In cantiere viene di solito misurata la quota di boccapozzo in metri sul livello del mare che viene considerata approssimativamente coincidente con la quota assoluta del piano campagna.

Il modello digitale del suolo (DEM) ufficiale della Regione Lazio ha una risoluzione di 20 metri. I dati topografici acquisiti nella banca dati permettono di elaborare un dem a maggiore risoluzione con dati aggiornati. Per testare la bontà dei modelli elaborati a partire dai dati topografici in possesso è stato usato come riferimento altimetrico di massima il DEM ufficiale a 20m.

Nel confronto tra i DEMs si è voluto mostrare anche i risultato ottenuto con i dati estrapolati dalla cartografia di Metro C Spa. Rispetto a questi dati mancano le informazioni al contorno, in particolare le specifiche del sistema locale adottato nel rilievo topografico plano-altimetrico. Si è ottenuto il DEM a partire dai punti quotati ed isoipse della banca dati Cartesia 1999, con la dimensione dei *pixel* a 5m. Si illustra per tappe il processo metodologico applicato:

1. I punti quotati sono stati filtrati togliendo i dati considerati anomali rispetto alla topografia dell'area; in particolare sono stati tolti punti con valore di elevazione pari a zero o a valori superiori a 100, legati verosimilmente ad errori nell'inserimento o nell'acquisizione dei dati;
2. Si è elaborato i dati puntiformi e lineari (isoipse) rispetto alla funzione *TopoToRaster* presente in ArcMap 9.2™ nel *tool "3D Analist*", il modello digitale dell'area.
3. Si è confrontato il DEM ottenuto con quello di riferimento attraverso la distribuzione di cinque classi altimetriche e quantizzandone le differenza di quota in modo assoluto e relativo;
4. Si è poi valutata la distribuzione delle informazioni topografiche di partenza per valutare i limiti dell'estrapolazione.

TopoToRaster è un metodo di interpolazione ideato appositamente per la creazione di superfici corrette dal punto di vista idrologico (DEMs). Il metodo si basa su *ANUDEM*, un programma sviluppato da Michael Hutchinson (1988). L'articolo di riferimento è quello di Hutchinson & Dowling (1991) o di Hutchinson (1993). L'interpolatore considera gli elementi morfologici come creste o elementi fluviali per calcolarsi la rete di drenaggio del terreno ed estrapola le quote relative alle aree senza informazioni attraverso un tecnica di interpolazione iterativa alle differenze finite. Tale tecnica è ottimizzata per avere una efficienza nel calcolare il metodo di interpolazione localmente, come il metodo dell'inverso della distanza (IDW), senza però far perdere di continuità alla superficie che si sta calcolando con metodi di interpolazione globale come il *Kriging* and lo *Spline*. Essenzialmente il metodo *TopoToRaster* con una tecnica di discretizzazione di Wahba (1990), approssima la superficie localmente modificata in modo da consentire al DEM di seguire il più verosimilmente i cambi bruschi di pendenza o la rete del drenaggio.

La validazione del DEM elaborato e cioè la verifica della sua correttezza in modo speditivo è partita dal confronto tra le fasce altimetriche individuate nel DEM a 20 metri/pixel, ufficiale e quindi garantito nella bontà della sua aderenza alla realtà che rappresenta. Il DEM, chiamato da qui in poi Cartesia vista la fonte dei dati, ha risoluzione maggiore pari a 5 metri/pixel. Tale differenza di risoluzione comporta, come risulta evidente dal confronto in Figura 55, una maggiore articolazione delle quote all'interno delle fasce altimetriche.

Da una prima osservazione dei due DEMs si nota che la distribuzione spaziale delle fasce altimetriche è in linea di massima rispettata. L'andamento delle aree omogenee per quota in entrambe i DEMs, descrivono un paesaggio simile. Si riconosce un rilievo allungato in direzione SO-NE costituito da due parti, connesse in cresta nel caso del DEM Cartesia (la collina del Celio) ed una valle allungata nella stessa direzione alle sue pendici (la valle del Fosso delle Acque Mariane). Le arre di cresta sono più ampie nel caso b) e la valle che ha il suo minimo altimetrico verso Porta Metronia sale verso Porta San Giovanni con una pendenza maggiore. La distribuzione delle fasce altimetrica, come restituita dagli istogrammi in d), mostra una discreta differenza. E' da notare che vista la differenza di risoluzione, le celle del DEM Cartesia sono di un ordine di grande in più rispetto al modello del terreno a 20m/px. Ad ogni modo le cinque classi individuate dal modello digitale di riferimento non sono sufficienti in quanto nel DEM elaborato vi sono dei valori massimi più elevati di circa 6 metri, ma che rappresentano delle piccole aree sulle creste.

La classi maggiormente rappresentate nel DEM Cartesia sono quella da 42 a 49 e quella da 37 a 42. La distribuzione in questa elaborazione sembra aumentare linearmente coi valori delle classi, mentre nel DEM di riferimento sono distribuite in modo più uniforme. La quota media è di 37.5 in a) e di 39.5 in b).

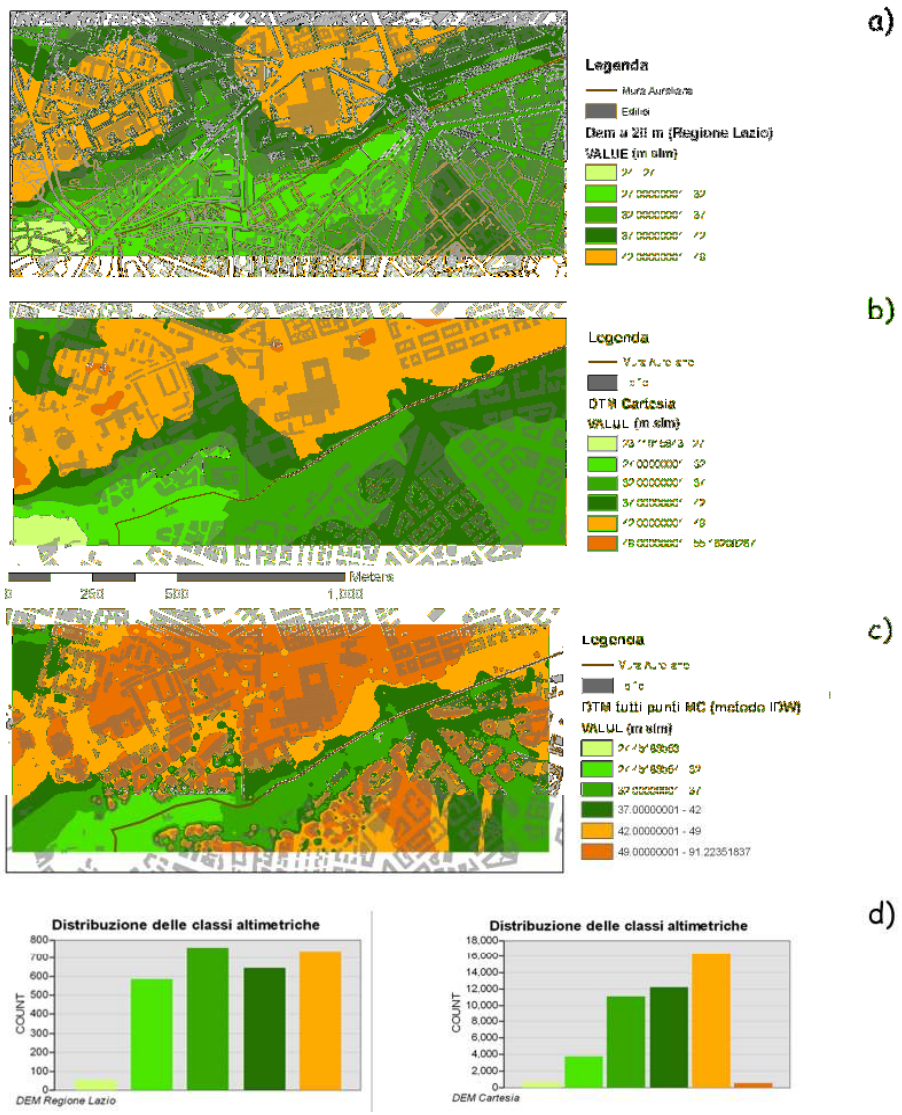


Figura 55: Modelli digitali del terreno relativi all'area di Porta Metronia, elaborati da informazioni topografiche puntuali interpolate nel caso a) con il metodo *TopoToRaster* del tool *3D Analist* di ArcMap™ 9.2 (vedi testo), e con il metodo dell'inverso della distanza (IDW) nei casi b) e c); tale metodo attribuisce un valore in un punto in base ai 12 punti che trova più vicini e attribuisce un peso funzione dell'inverso della distanza; questo deriva dalla legge di per cui punti più vicini sono più simili di punti tra loro lontani. In legenda sono indicate le fasce altimetriche presenti nel modello I DEMs sono:

a) Dem della Regione Lazio a 20 metri;
b) Dem dei punti Cartesia 1999;
c) Dem dei punti totali rilevati da Metro C

In c) si mette in evidenza l'impossibilità di utilizzo dei dati Metro C, sebbene siano ad un dettaglio maggiore; le classi altimetriche hanno una distribuzione spaziale troppo localizzata e spesso coincidente con il perimetro degli edifici. Si noti però che le quote in valle, dove vi sono meno edifici sono paragonabile a quelle in b).

In d) sono illustrati gli istogrammi relativi alla distribuzione delle classi altimetriche nel DEM Lazio (a destra) e nel DEM Cartesia (a sinistra).

Una misura rappresentativa delle differenze altimetriche tra i due DEMs è presentata in Figura 56. Grazie alla funzione *raster calculator* del *tool Spatial Analist* di ArcMap™ 9.2, si è calcolata la differenza in metri, sottraendo al DEM di riferimento il modello digitale della elevazione del terreno elaborato. La differenza madia assoluta è compresa tra 0-2 metri, ma le aree con differenze maggiori sono piuttosto estese. In particolare il DEM Cartesia presenta dei valori altimetrici maggiori di 5-10 metri in corrispondenza della parte

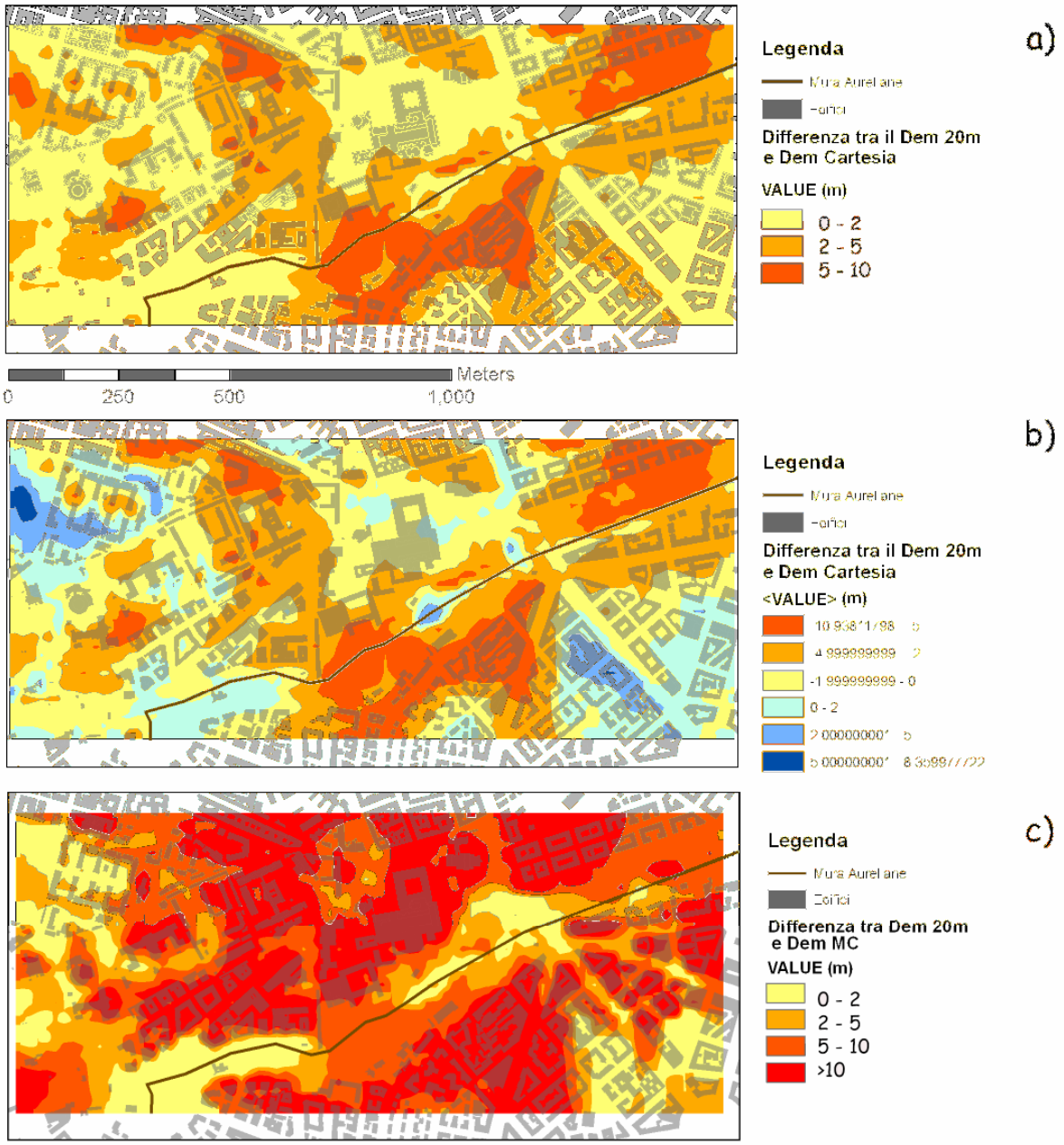


Figura 56: Confronto tra i DEMs e calcolo in metri della differenza assolute (a, c) e delle differenze relative tra le loro quote attraverso il *raster calculator, tool Spatial Analist* di ArcMap™ 9.2. In a) e b) l'operazione di sottrazione è tra il DEM di riferimento e il Dem Cartesia, mentre in c) si sottrae il DEM ottenuto con i dati Metro C. In c) la differenza media supera i 10 m e le aree comprese tra 0-2 m sono molto localizzate e limitate. Nell'interpretazione di b) i valori della scala dal rosso al giallo sono aree sopraelevate rispetto alla superficie di riferimento, mentre la scala dei blu indica aree relativamente più depresse.

centrale della valle, nella parte NE dell'area e nell'area di raccordo tra le due aree della collina del Celio. Risulta invece più depressa della superficie di riferimento sulla collina nella parte NO, nel settore di valle a SE.

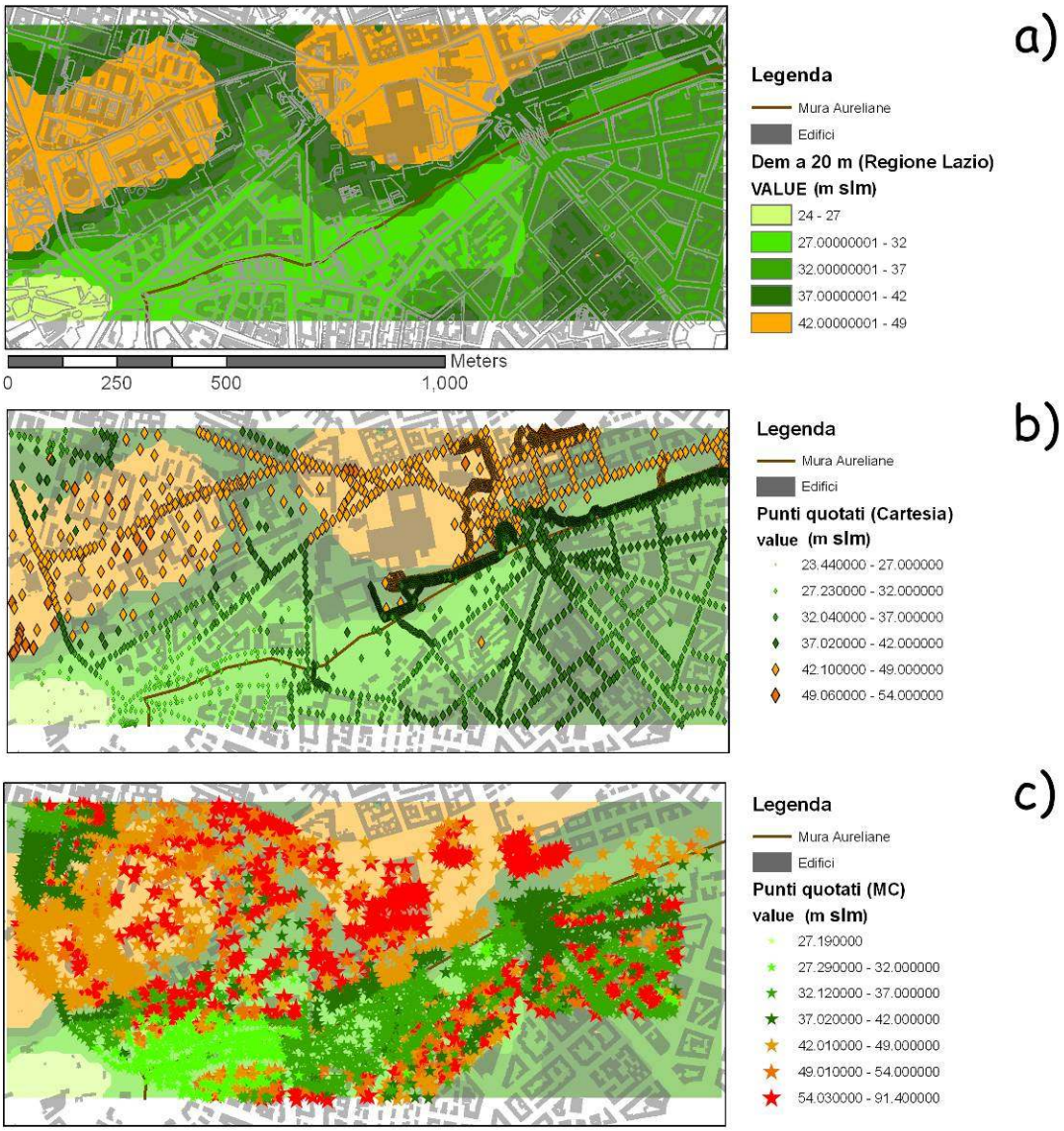


Figura 57: Distribuzione dei valori delle quote rispetto al livello del mare dei punti quotati forniti da Cartesia Spa e Metro C Spa, raggruppati in classi altimetriche confrontabili con il modello digitale di elevazione del terreno a 20 m (a- DEM ufficiale della regione Lazio) in trasparenza in b) e c). Per rappresentare la distribuzione dei punti in c) è servito considerare due ulteriori fasce altimetriche che comprendessero le quote tra 49-91.4 m slm. Verosimilmente la distribuzione di queste classi coincide con gli edifici.

Prendendo in considerazione dei punti quotati che sono stati i dati di partenza per l'elaborazione dei DEMs a 5m/px, si nota una diversa distribuzione spaziale e dei valori

altimetrici (Fig. 57). I punti Cartesia hanno quote comprese tra i 23.4 e i 54 m slm e sono stati rilevati principalmente lungo gli assi stradali. L'area intorno alla Basilica di San Giovanni in Laterano risulta praticamente priva di misure.

Le differenze tra i DEM Cartesia e quello ufficiale della regione Lazio non risultano trascurabili. Sono nell'ordine di -2.2 con una deviazione standard di 2.6, ossia rispetto al DEM di riferimento, la superficie elaborata risulta mediamente più elevata di 2 m con una dispersione delle misure di ± 2.6. In parte il risultato è giustificabile per la diversa risoluzione che comporta una maggiore disomogeneità nella superficie elaborata, risentendo delle variazioni locali. Rimane il fatto che in un confronto topografico 2 m di differenza per uno stesso elemento misurato costituiscono un errore ben oltre quello accettabile.

A questo punto si è deciso di analizzare la congruenza del modello digitale del terreno elaborato rispetto alle quote di boccapozzo. In effetti l'elaborazione del modello è finalizzata in parte anche a rappresentare il piano campagna da cui parte l'asse delle profondità a cui si riferiscono i dati del sottosuolo. Considerando le ubicazioni planimetriche ed altimetriche dei sondaggi affidabili, si sono confrontati i valori altimetrici nel punto di sondaggio come indicato dalla documentazione, come estrapolato dal DEM di riferimento della Regione Lazio e dal DEM Cartesia elaborato (Fig. 58).

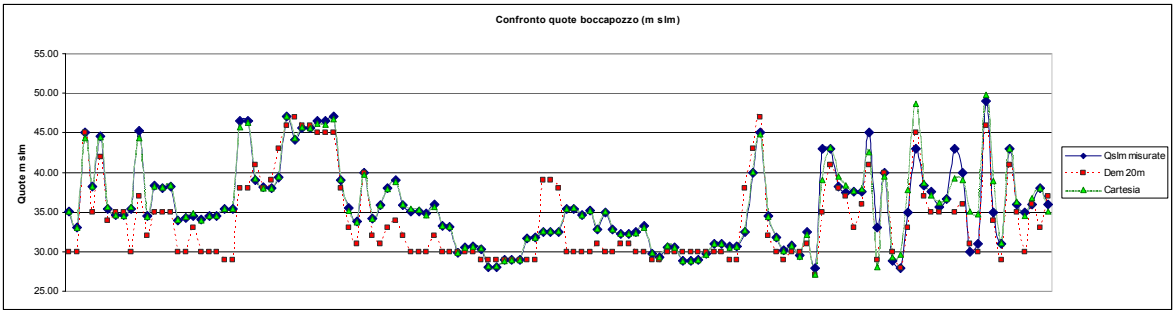


Figura 58 – Grafico del confronto delle quote dei punti di sondaggio rispetto alla documentazione (in legenda Qslm misurate) ed estrapolate dal DEM Lazio e dal DEM Cartesia (rispettivamente in legenda, Dem 20m e Cartesia).

In modo in prima analisi inatteso, ma giustificato dalla risoluzione a 20 m/px, i valori estrapolati dal DEM di riferimento sono sistematicamente differenti da quelli misurati in cantiere o dedotti dalla cartografia di base. Le quote dei sondaggi estrapolate da DEM Cartesia, invece, approssimano quasi nella totalità le quote di boccapozzo ottenute dalla documentazione (valore medio della differenza 0.04 m contro 1.81 del DEM Lazio).

Per quanto emerso in questo ultimo confronto, si è deciso di utilizzare il DEM Cartesia come superficie altimetrica di riferimento per le analisi territoriale dell'area considerata e soprattutto per l'informazione del sottosuolo.
I dati presentati nei prossimi paragrafi ed in particolare il calcolo delle quote assolute, è effettuato a partire dalla superficie topografica digitale definita dal DEM Cartesia.

9.1.2.2 *I dati stratigrafici*

I dati stratigrafici sono da una parte relativi alle descrizioni stratigrafiche di cantiere dei sondaggi a carotaggio continuo, acquisiti nella tabella **St** e dall'altra alla cartografia geologica (Funiciello & Giordano 2005), descritta con geometria di superficie (poligoni) e rappresentata nello *shape file* **CARG_map**.

Interrogando la tabella **St** ed in particolare i *records* relativi all'area di studio rispetto al campo *FirstLayer* è possibile vedere se il primo strato individuato al di sotto della coltre dei riporti coincide con la cartografia rappresentata da **CARG_map**.

Le descrizioni stratigrafiche di cantiere dei diversi strati danno indicazioni sulla granulometria, litologia, presenza di materia organica e sulla plasticità dei terreni recuperati durante il carotaggio. Sono presenti in modo discontinuo informazioni sulla resistenza alla punta relativi a misure con il penetrometro tascabile.

Le unità geologiche presenti nell'area di Porta Metronia, non considerando lo strato di riporti che le ricopre, ottenute interrogando spazialmente il livello informativo **CARG_map**, sono le seguenti partendo dall'alto verso il basso:

1. nell'area del Celio e alla sinistra idrografica del Fosso delle Acque mariane, a partire dai depositi più in alto per posizione stratigrafica: (a) Tufo di La Storta, deposito da ricaduta sabatino (LTT), (b) deposito delle Pozzolane Rosse di origine albana (RED), (c) la formazione del Tufo stratificato varicolori di Sacrofano pertinente al distretto vulcanico sabatino (SKF), e (d) la formazione del Palatino (PTI), primo deposito ignimbritico relativo all'inizio dell'attività vulcanica del Vulcano Laziale;
2. al di sotto all'alternanza dei depositi vulcanici dei distretti sabatino ed albano sopra elencati si trova la formazione di Santa Cecilia (sigla CIL) di età Pleistocene medio, un ciclo sedimentario da pre a sin-vulcanico, costituito da ghiaie basali piuttosto evolute di composizione prevalentemente calcareo-selcifera, sabbie, limi ed argille con presenza di scorie e minuti minerali vulcanici;
3. i depositi vulcanici e sedimentari del Paleotevere sono incisi dal Fosso delle Acque Mariane e la paleovalle è colmata dai sedimenti vulcanoclastici e terrigeni sabbioso limosi delle alluvioni oloceniche, spesso ricchi in materia organica.

La serie stratigrafica si completa con la formazione di Monte Vaticano, argille limose e sabbiose nella parte sommitale che non affiora nell'area, ma che stratigraficamente si trova alla base delle ghiaie del ciclo sedimentario del Paleotevere.

In sondaggio si riconosce dall'alto verso il basso la seguente sequenza litostratigrafica:

1. Terreni di riporto, caratterizzati da una importante variabilità granulometrica e di spessore, da ghiaia ad argilla, con diffuso materiale antropico, quali frammenti di laterizi, muratura, calcinacci ecc. Il colore va dalla scala dei marroni a quella dei grigi, e spesso vengono descritti frammenti tufacei. A volte, intercalato al materiale schiettamente di origine antropica, si rinvengono livelli argilloso limosi con tessiture fluitate probabilmente correlabili ad alluvioni storiche (litotipo TA).
2. Nelle zone rilevate sono descritte alternanze di materiale argilloso-cineritico a livelli sabbioso scoriacei di origine vulcanica, di colore marrone scuro, a tratti incoerenti, a tratti cementati, da sciolto a litoide.
3. Nelle zone a quote inferiori rispetto il rilievo del Celio, coincidenti con l'andamento della paleovalle, si rinviene al di sotto dei riporti un deposito limoso argilloso di colore nerastro ricco in materia organica da poco a mediamente consistente e poco plastico (litotipo LSO).
4. Al disotto dei depositi vulcanici viene descritto un deposito sabbioso da fine a grossolano di colore giallastro ad ocra, con sfumature verdastre, con intercalati livelli di decimetrici di travertino, con frustoli ed elementi vegetali.
5. In modo continuo si rinviene tra i venti ed i quindici metri dal piano campagna, al letto dei depositi descritti nei punti 3. e 4., un ciclo sedimentario nel quale si distinguono uno strato sommitale costituito dall'alternanza di livelli di argille, limi, sabbie e termini intermedi di colore assai variabile da verdastro, marrone scuro a ocra, grigio-giallastro, con rare concrezioni calcaree, sporadici frammenti scoriacei-vulcanici (litotipo A o S), ed una strato di ghiaie basali in matrice sabbiosa, sciolte di colore chiaro, deposito di ciottoli calcarei e selciferi con spessore medio di 4-5 metri (litotipo G).
6. Al letto delle ghiaie basali si rinviene sistematicamente un deposito di colore azzurrognolo-giallastro a granulometria fine variabile da limoso sabbioso ad argilloso limoso, da mediamente a molto consistente (litotipo APL).

Il dato stratigrafico di sondaggio è stato arricchito dall'interpretazione geologica, individuando da un lato, le unità descritte nella nuova cartografia di Roma (campo *cod_Carg* della tabella **St**) e dall'altro, le unità informali derivate dagli studi paleogeografici (campo *lito* della tabella **St)**. Gli aspetti inerenti all'interpretazione sono

illustrati ed affrontati nel Paragrafo 9.1.3. e di seguito si fornisce in modo schematico l'attribuzione delle unità riconosciute sopra:

1. Riporto (*cod-Carg*), riporto (*lito*);
2. ---, Vulcanico generico;
3. ba (depositi alluvionali olocenici), alluvioni oloceniche;
4. VGU (Valle Giulia), depositi sin-eruttivi pleistocenici;
5. CIL (Santa Cecilia), depositi sin-eruttivi pleistocenici;
6. MVA (Formazione di Monte Vaticano), argille plioceniche.

I dati geotecnici, illustrati nei prossimi paragrafi, fanno riferimento a queste unità ed in particolare ai litotipi.

9.1.2.3 *I dati geotecnici*

I dati geotecnici sono individuati nella banca dati in funzione della metodologia di acquisizione. I dati geotecnici estraibili sono:

a) Dati geotecnici relativi a prove in situ con metodi non geofisici pertinenti alle tabelle **Gst**, **SPT**, **mCPT**:

1 – SPT

2. – CPT

3. – DPSH, Prove pressiometriche, Prove di permeabilità

I dati geotecnici in situ sono principalmente relativi alla tipologia ed alla quantità di informazioni disponibili e solo per le prove penetrometriche statiche (CPT) e dinamiche (SPT), l'interrogazione del *database* restituisce dei valori numerici ottenuti dalle rispettive prove, rappresentativi dei parametri geomeccanici propri della porzione di terreno investigata (rispettivamente numero di colpi, resistenza alla punta e laterale).

La trattazione dei dati geotecnici non viene affrontata in questa Tesi in quanto esula dallo scopo primario della Tesi stessa. I dati geotecnici inseriti nella banca dati, appartengono alle campagne geognostiche della nuova metropolitana di Roma e sono stati interpretati e analizzati approfonditamente in diversi lavori (Burghignoli *et alii* 2003, Viggiani *et alii* 2004).

In Figura 59 è presentato un esempio di grafico ottenibile interrogando la banca dati in cui è illustrata la distribuzione dei risultati ottenuti per le prove SPT in funzione della profondità e del litotipo.

Il litotipo TA, relativo ai terreni di riporto presenta un intervallo di risultati piuttosto ampio (N_{SPT} da 5 a 74) dovuto alla eterogeneità granulometrica, composizionale e del grado di addensamento del deposito. Sovente si rinvengono frammenti di muratura che possono determinare valori di rifiuto della prova.

Il litotipo LSO, caratteristico dei depositi alluvionali recenti, presenta dei valori di N_{SPT} compresi tra 2 e 43, che non incrementa in modo sistematico con la profondità. A questo intervallo di valori appartengono anche più della metà dei risultati ottenuti sulla porzione argillosa-sabbiosa del ciclo sedimentario al di sotto dei depositi alluvionali. L'altra metà di risultati ha valori superiori che incrementano con la profondità.

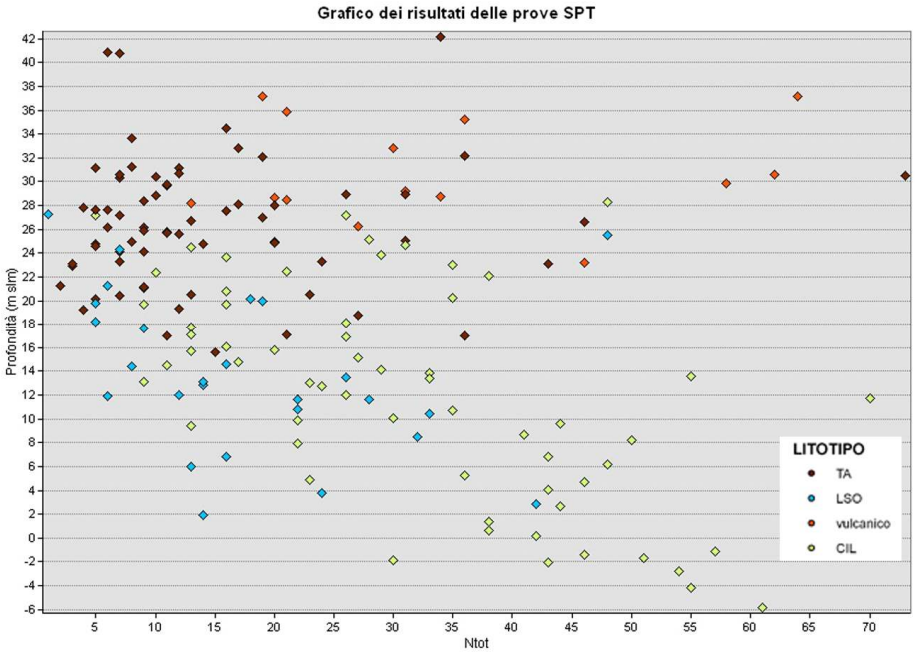


Figura 59: Il grafico illustra il campo di variabilità dei risultati delle prove dinamiche SPT in funzione alla profondità di inizio della prova e rispetto al litotipo investigato. Non sono riportati i risultati di rifiuto con valori maggiori ai 100 colpi.

Le prove di sito pressiometriche (Menard) e di permeabilità (Le Franc) sono fruibili nel *database* come immagini dei grafici originali.

Le prove pressiometriche eseguite sulle argille del litotipo APL danno valori del modulo pressiometrico, E_M, compresi tra 48 e 70 MPa; la stima della coesione non drenata conduce a valori comprese tra 450 e 550 kPa. I valori relativi ai litotipi LSO e CIL-A/S risultano più

dispersi con valori compresi per E_M tra 5 e 30 MPa, con resistenze non drenate stimate pari a 25 – 100 kPa

I dati di permeabilità indicano valori relativamente elevati nei depositi antropici dei riporti ($k \approx 5x10^{-5}$ m/s) e nella facies ghiaiosa, CIL-G ($k \approx 2 \div 4.5x10^{-5}$ m/s), leggermente minori nelle argille basali plioceniche (APL) ($k \approx 6x10^{-6}$ m/s) e nelle alluvioni ($k \approx 2x10^{-6} \div 2x10^{-5}$ m/s).

b) Dati geotecnici relativi a prove in situ con metodi geofisici in foro estratti dalle tabelle **Vps** e **V**;

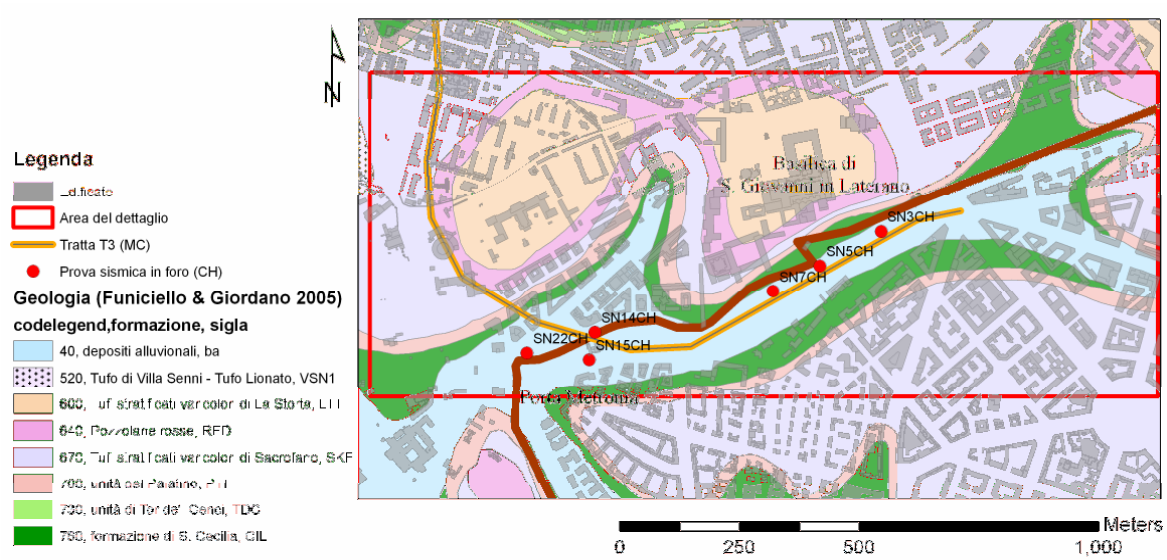


Figura 60 : Ubicazione delle prove sismiche in foro di tipo *cross hole*

Sono state estratte dalla tabella **Vps** e quindi dalla tabella **V**, sei prove sismiche in foro relative alla metodologia *cross hole* ed il valore delle velocità delle onde di volume, misurate a diverse profondità. Le ubicazioni delle prove sono indicate in Figura 60 e attraversano i depositi olocenici lungo la valle.

c) Dati geotecnici relativi a prove di laboratorio in condizioni statiche su campioni indisturbati (tabelle **sa**, **LS**, **StL**)

Sui campioni indisturbati prelevati, oltre alla caratterizzazione fisica dei terreni (granulometria, peso di volume, contenuto in acqua, limiti di Atterberg, ecc) si sono

effettuate per la componente limoso-argillosa delle prove edometriche, di taglio diretto, di espansione laterale libera, triassiali drenate consolidate, non drenate e non consolidate, ecc. Per queste prove il database è in grado di fornire la tipologia di prova eseguita e, per le prove di taglio diretto, triassiale ed espansione libera relativi ad un campione indisturbato, restituisce i valori misurati di coesione drenata e non, l'angolo di attrito. In Tabella 15 sono mostrati gli intervalli di valori misurati nella prove di laboratorio suddette.

Unità	γ kN/m^3	Wn %	LL %	IP %	φ'	C' kPa	Cu kPa
TA	16-19	38	ND-48	NP-15	30-35	-	-
LSO-A	16-21	18-54	12-69	6-36	0-33	5-54	47-142
G	18-20	18-30	--	--	37-40	--	--
Apl	20-22	16-20	42-44	19-23	0-26	50	400-600

Tabella 15: Principali parametri fisico-meccanici per i diversi i litotipi individuati.

I parametri geotecnici per la litofacies relativa ai depositi alluvionale (LSO) e per la facies argillosa dei depositi del ciclo sedimentario sottostante (CIL-A) presentano valori simili e per questo sono stati accorpati . Tali valori relativi alla Tabella sono ottenuti dalla banca dati tramite l'applicazione per ogni litotipo delle funzione statistiche di base (massimo, minimo, media, deviazione standard, ecc).

d) Dati geotecnici relativi a prove di laboratorio in condizioni dinamiche su campioni indisturbati (tabella **SpL**):

Per questo tipo di prova il *database* non restituisce valori numerici ma permette di accedere alla documentazione tramite i collegamenti ipertestuali, memorizzati nella tabella *pLink*.

9.1.2.3 *I dati piezometrici*

I dati piezometrici sono estratti dalla tabella **Idro** e si sono considerati i soli dati di falda, ottenuti attraverso la relazione con la tabella **pHead**, relativi alle misure effettuate nei piezometri di tipo Casagrande.

Per i dati piezometrici il *database* fornisce la tipologia e la quantità dei piezometri installati in foro e a quale quota, nonché i livelli piezometrici misurati in diversi periodi.
I dati piezometrici indicano la presenza di due falde, una più superficiale nei riporti alla quota assoluta di 21-22 metri una più profonda nelle ghiaie basali tra i 16 e i 18 metri sul livello del mare.

I dati geotecnici inseriti nella banca dati, appartengono alle campagne geognostiche della nuova metropolitana di Roma e sono stati interpretati e analizzati approfonditamente in diversi lavori (Burghignoli *et alii* 2003, Viggiani *et alii* 2004).

9.1.3 Interpretazione stratigrafica

L'interpretazione stratigrafica si basa sulle informazioni geologiche di superficie indicate nella nuova cartografia di Roma (Funiciello & Giordano 2005), implementate nel *geodatabase* nel tematismo *Geology* attraverso lo *shape file* di poligoni **CARG_map**, e correlate alle informazioni litologiche relative ai diversi strati individuati durante le perforazioni. Le attribuzioni geologiche sono quindi di tipo litostratigrafico e non è stato possibile effettuare ulteriori analisi specifiche. Bisogna infatti tener conto del fatto che i dati acquisiti, in particolare quelli geotecnici, sono stati commissionati nell'ambito della progettazione della nuova linea metropolitana di Roma e quindi risentono nell'ubicazione dei sondaggi, nella scelta dei campioni e delle prove geotecniche delle finalità dello specifico progetto.

Per l'attribuzione alla Formazione di Monte Vaticano si sono considerate le caratteristiche geotecniche, in particolare i valori di resistenza alla punta misurate in sito tramite penetrometro tascabile. Infatti a tale formazione corrispondono valori superiori ai 4 kg/cm^2 (Bozzano *et alii* 1998).

Sono stati eseguiti una serie di sezioni geologiche sia ad andamento longitudinale, sia ad andamento trasversale rispetto all'andamento NE-SO della valle (Figura 61).

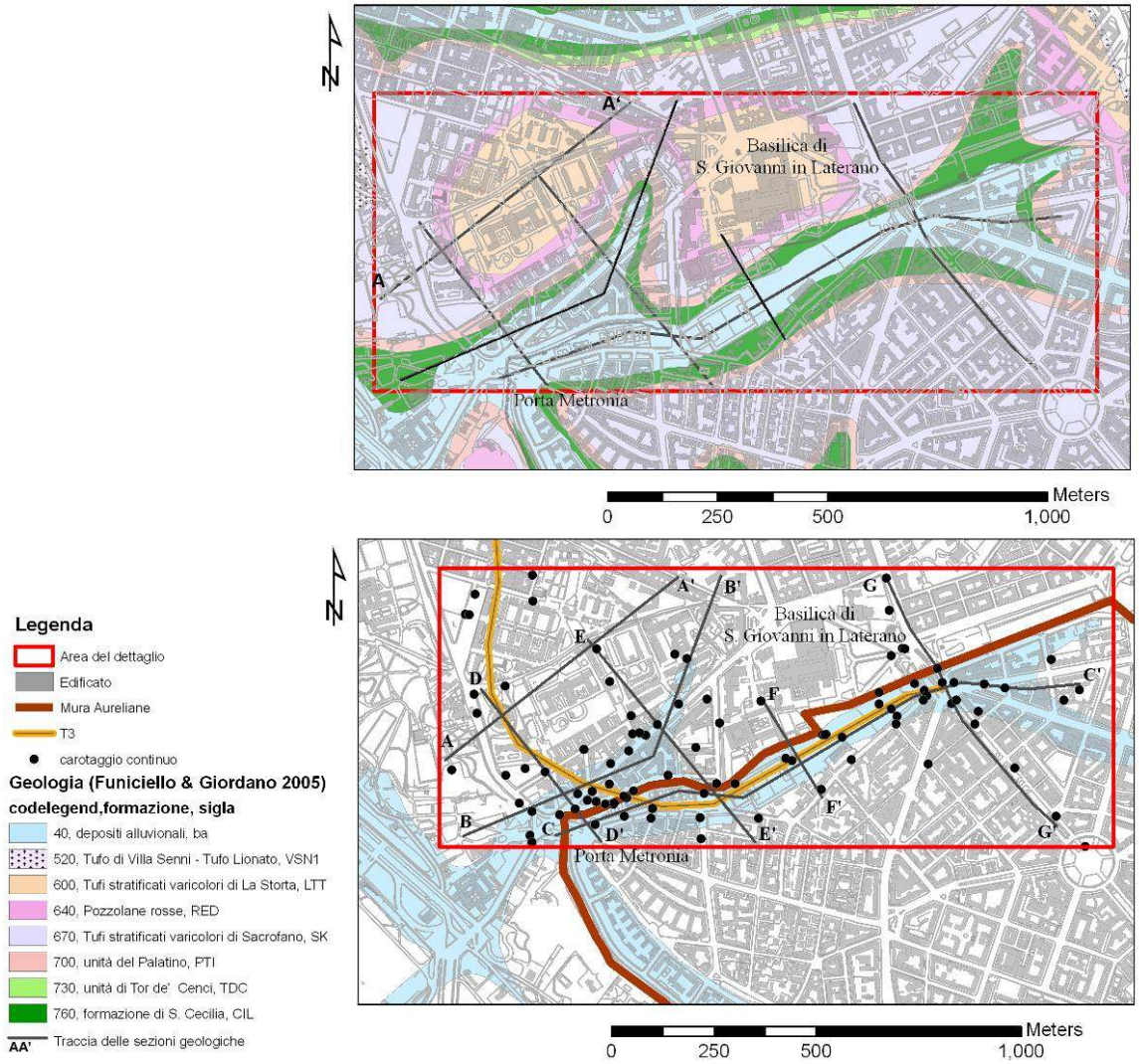


Figura 61: Carta geologica e traccia delle sezioni con i sondaggi nell'area di Porta Metronia.

In tutte le sezioni (Figg. 62-63) si riconosce la coltre dei terreni di riporto con spessore medio di 15 metri, massimo in corrispondenza della valle e che va ad assottigliarsi verso i rilievi vulcanici. Lungo tali rilievi sono presenti al di sotto della formazione dei riporti, dei depositi vulcanici di granulometria variabile e di colore da marrone scuro a grigiastro. Gli spessori medi sono dell'ordine dei 5-8 metri e non superano i 12. Il grado di cementazione è piuttosto disomogeneo, non di rado i depositi risultano molto alterati e parzialmente argillificati. Nell'attribuzione ci si è limitati a definirlo come deposito vulcanico non distinguibile, non essendoci nelle descrizioni di cantiere caratteri sufficienti per distinguere il distretto di provenienza.

Il deposito sabbioso travertinoide con intercalazioni di travertino è stato attribuito alla Formazione di Valle Giulia ed è caratterizzato da spessori inferiori ai 5 metri.

Il ciclo sedimentario che si riconosce in modo continuo in tutti i sondaggi analizzati è stato attribuito alla Formazione di S. Cecilia (CIL), che rappresenta un ciclo deposizionale da pre a sineruttivo. I depositi relativi mostrano una scarsa presenza di materiale di origine vulcanico (frammenti minuti di cristalli vulcanici, scorie), del tutto assenti nella parte ghiaiosa basale, prodotto di un ambiente ad alta energia. Questi depositi, pertinenti ad un ambiente paleogegrafico fluviale tipo il Paleotevere, sono descritti dalla sola informazione litologica e dalla posizione stratigrafica. In realtà sono diversi i cicli sedimentari individuati nell'area romana ascrivibili alla migrazione del Paleotevere dal proprio alveo, compresi nella stessa posizione stratigrafica, uno fra tutti il ciclo del Fosso della Crescenza. L'attribuzione qui effettuata si basa sui criteri di riconoscimento litologici e segue l'interpretazione della nuova cartografia geologica di Roma.

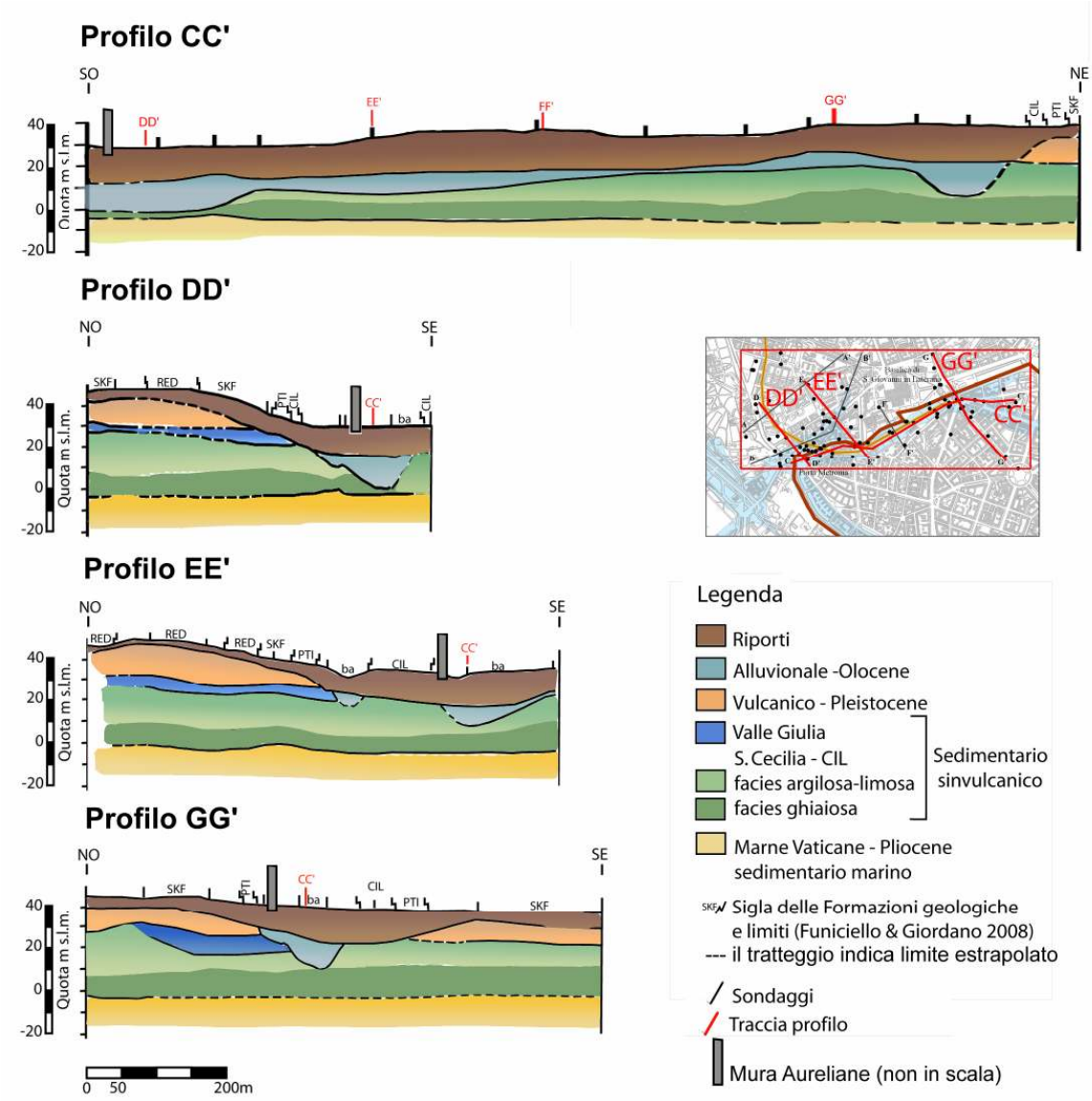


Figura 62: Profili stratigrafici nell'area di Porta Metronia, interpretati dai dati di sondaggio ed in base alla nuova cartografia geologica di Roma (Funiciello & Giordano 2008)

Il ciclo deposizionale di S. Cecilia ha uno spessore variabile da 1-2 metri, laddove il fosso ha maggiormente inciso il substrato, fino a un massimo di 25 metri al di sotto dei rilievi vulcanici (Figura profilo AA', BB',ecc). I depositi che costituiscono tale ciclo sono riconducibili a due litotipi principali: uno argilloso-limoso-sabbioso (litotipi CIL-A/S) con rare concrezioni carbonatiche a volte con livelletti torbosi, di colore da marrone scuro a giallastro ed un livello di ghiaie basali (litotipo CIL-G) di origine calcarea.

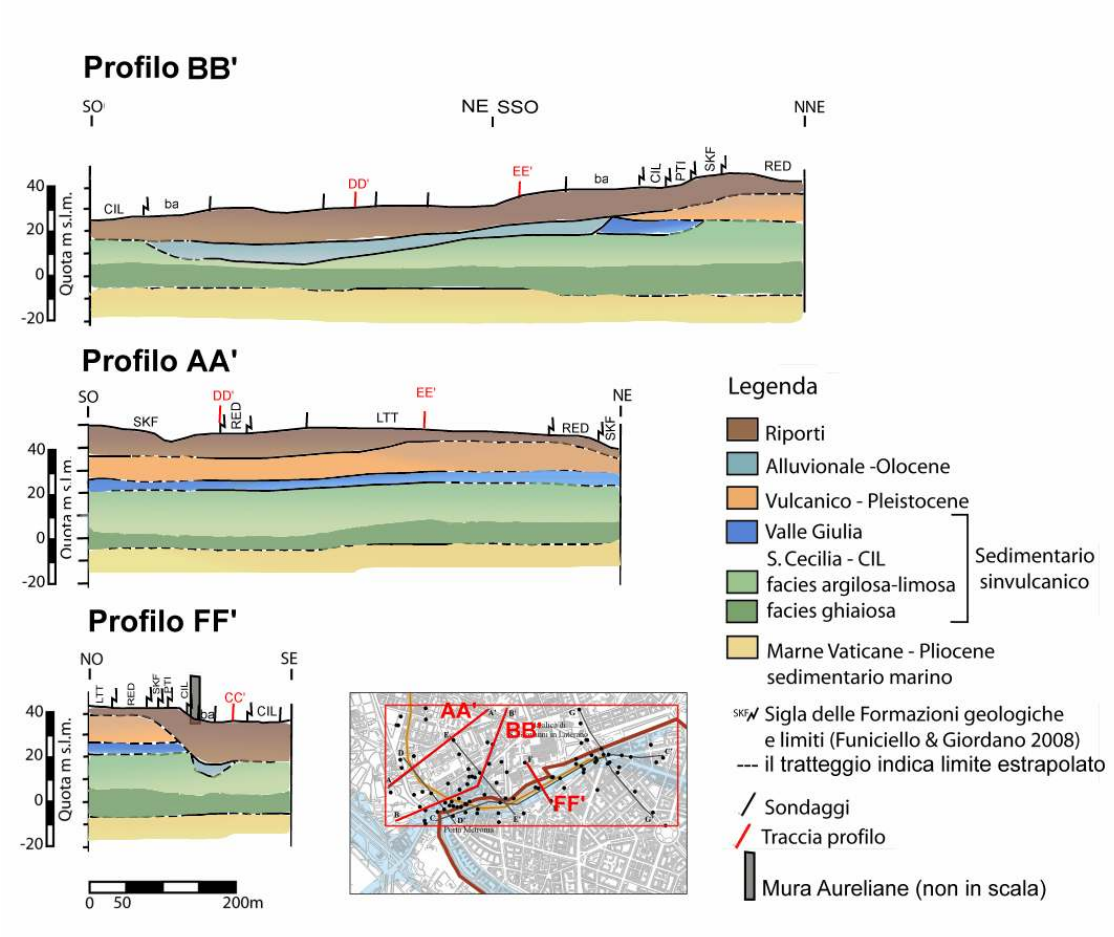


Figura 63: Profili stratigrafici nell'area di Porta Metronia, interpretati dai dati di sondaggio ed in base alla nuova cartografia geologica di Roma (Funiciello & Giordano 2008)

Al di sotto del ciclo deposizionale interpretato come S. Cecilia, si ritrova a quote comprese tra -4 e -6 metri (slm) un deposito argilloso, a tratti limoso, molto consistente (Rp> 4-6 kg/cm^3) di colore grigio-azzurrognolo riconducibile alla Formazione di Monte Mario (MVA, litotipo APL).

I depositi alluvionali relativi al paleofosso delle Acque Mariane incidono i depositi del ciclo di Santa Cecilia fino al livello delle ghiaie basali, senza toccare il deposito delle argille plioceniche (MVA). Le alluvioni oloceniche (ba) si riconoscono per il colore scuro-nerastro dovuto alla presenza di materia organica, la granulometria limoso-argillosa a tratti

sabbiosa e per valori di consistenza medio-bassi con Rp<1.9 kg/cm^3 (litotipo LSO). Lo spessore delle alluvioni del fosso (Fig. 64) presenta un valore massimo di 17.5 metri in corrispondenza della parte terminale della valle, in prossimità della confluenza nella valle Murcia.

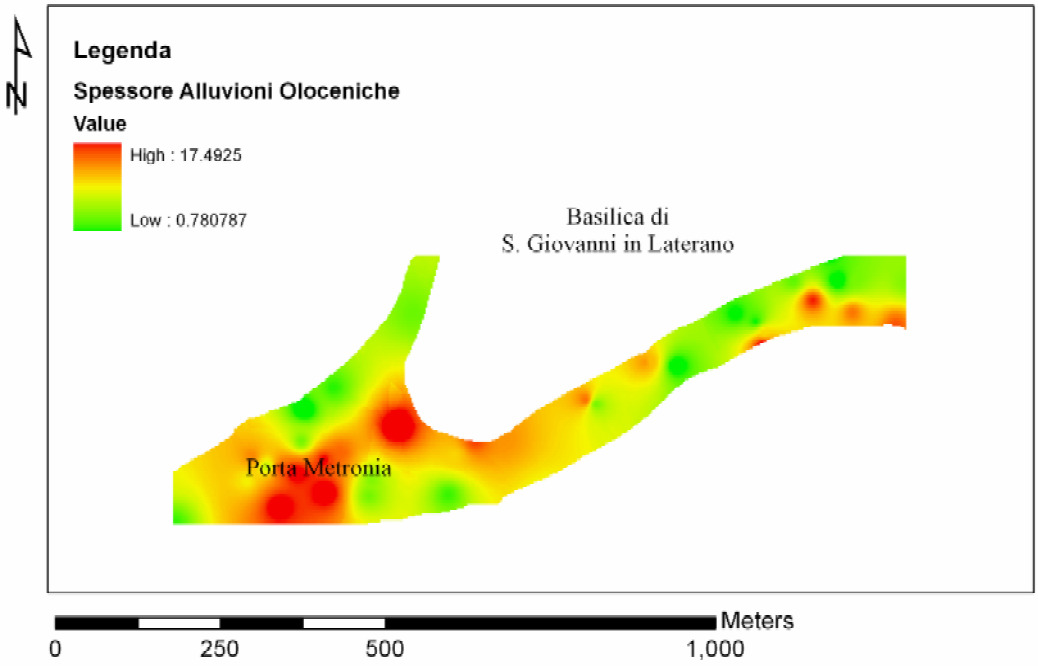


Figura 64: Mappa degli spessori dei depositi alluvionali, ottenuto dai dati di sondaggio tramite l'operazione di *raster calculator* tra il letto e il tetto del deposito alluvionale olocenici (ba).

Si è costruito a partire dai dati di sondaggio la mappa delle isopache dei terreni di riporto. Estrapolando i valori dai dati di sondaggio (Fig. 65d), si ottiene una mappa di spessori con valori che variano da un minimo di 2 metri ad un massimo di circa 21 metri. In linea generale i valori massimi si trovano in corrispondenza delle quote topografiche minori, lungo l'asse della paleovalle, mentre i terreni di riporto si rastremano lungo i rilievi vulcanici.

Si è verificata l'estrapolazione dei dati di spessore con un altro procedimento di analisi. Si è costruito la mappa delle isobate del letto dei riporti (Fig. 65a). Il letto dei riporti si approfondisce in corrispondenza della paleovalle e nel settore meridionale dell'area e presenta le quote più elevate sulla parte sommitale del rilevo del Celio. La superficie del tetto dei riporti è considerata coincidente con quella topografica, rappresentata dal DEM Cartesia (Fig. 65b). La morfologia attuale nell'andamento generale è simile all'andamento delle quote del letto, sebbene presenti una più ampia area rilevata. Attraverso il *raster calculator* si è sottratto alla mappa delle isobate del letto, il DEM corrispondente al tetto dei riporti, ottenendo in valore assoluto lo spessore del deposito. La mappa degli spessori

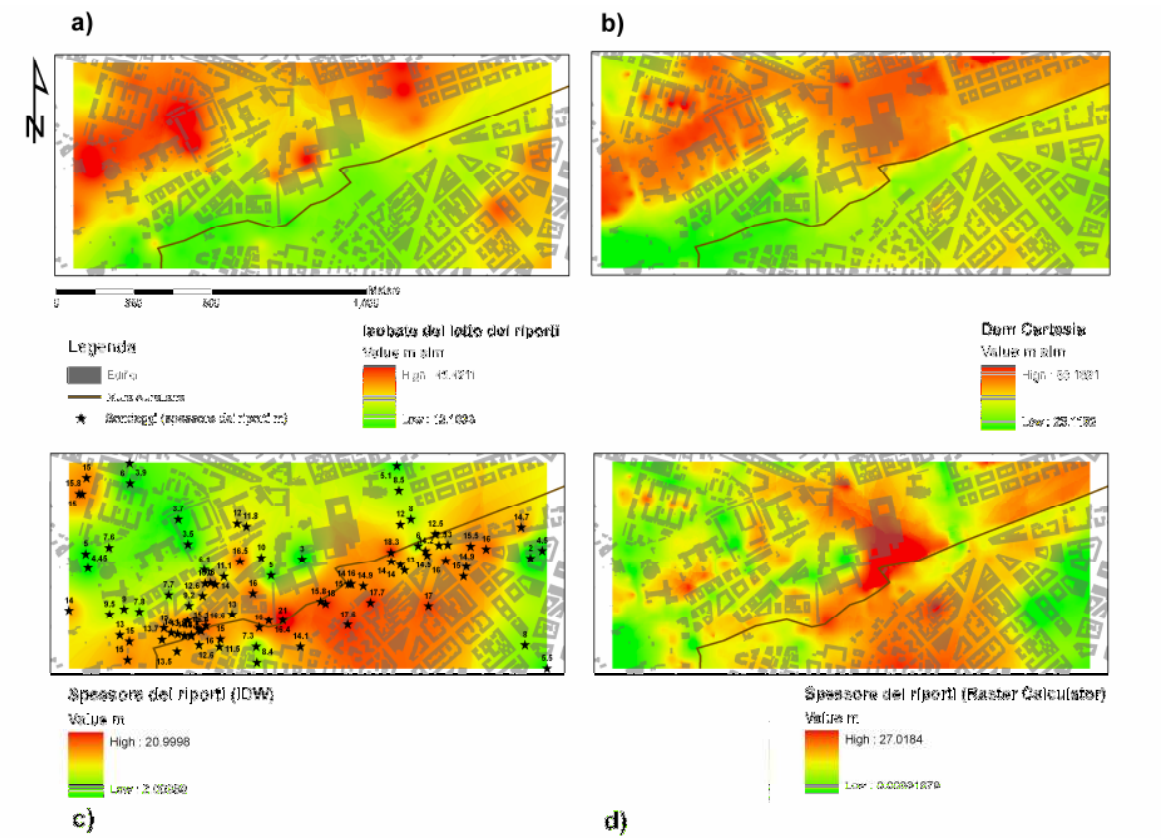


Figura 65: Confronto tra gli spessori dei terreni di riporti (c,d) calcolati con due diverse metodologie: 1) i dati di spessore dei riporti così come ottenuti da sondaggio **(c)**, sono interpolati con il metodo IDW (Metodo di interpolazione dell'inverso della distanza); 2) lo spessore dei terreni di riporto **(d)** è calcolato tramite *raster calculator*, sottraendo al letto dei riporti **(a)** la superficie topografica, DEM Cartesia **(b)**, assimilabile al tetto dei riporti.

che ne deriva (Fig. 65d) è piuttosto dissimile dalla precedente (Figura 65c). In questa mappa i valori di spessore variano da 0 a 27 metri; lo spessore massimo si individua lungo il fianco del rilevo in prossimità della Basilica di S. Giovanni. Tale dato di ispessimento dei depositi di riporto lungo il fianco del rilevo in prossimità della Basilica è confermato dalla sezione geologica FF' (Fig. 63), laddove lo spessore è però pari a una ventina di metri.

9.1.3.1 *Ricostruzioni delle superfici stratigrafiche*

I dati stratigrafici sono stati interpolati in superfici tramite il metodo dell'inverso della distanza (IDW). Tali superfici sono state visualizzate tramite il modulo *ArcScene* della *suite ArcInfo* versione 9.2 ESRI^{TM}, in un ambiente 2.5D. Di seguito vengono presentate le immagine relative alla visualizzazione delle superfici che è stato possibile ricostruire a

partire dai dati interpretati contenuti nel *geodatabase*. Le superfici stratigrafiche ricostruite e visualizzate in 2.5D sono:

1. Tetto (approssimabile alla superficie topografica DEM Cartesia) e letto dei riporti (R);
2.;Tetto e letto dei depositi alluvionali olocenici (ba);
3. Tetto e letto del deposito di S. Cecilia e tetto del suo livello di ghiaie basali (CIL);
4. Tetto delle argille plioceniche (MVA).

La rappresentazione non è stata effettuata rispettando la scala verticale 1:1, ma esagerandola del doppio rispetto a quella orizzontale; tale decisione è scaturita dalla necessità di rendere più visibile la morfologia delle superfici. In alcuni casi si è anche attribuito un significativo offset alle superfici, in quanto alla distanza originale non era possibile apprezzare il confronto tra di esse.

La visualizzazione, definita 2.5D perché non permette la manipolazione delle immagini possibili con software 3D, come le estrusione delle superfici in volumi, permette di seguire l'andamento generale delle superfici con la profondità.

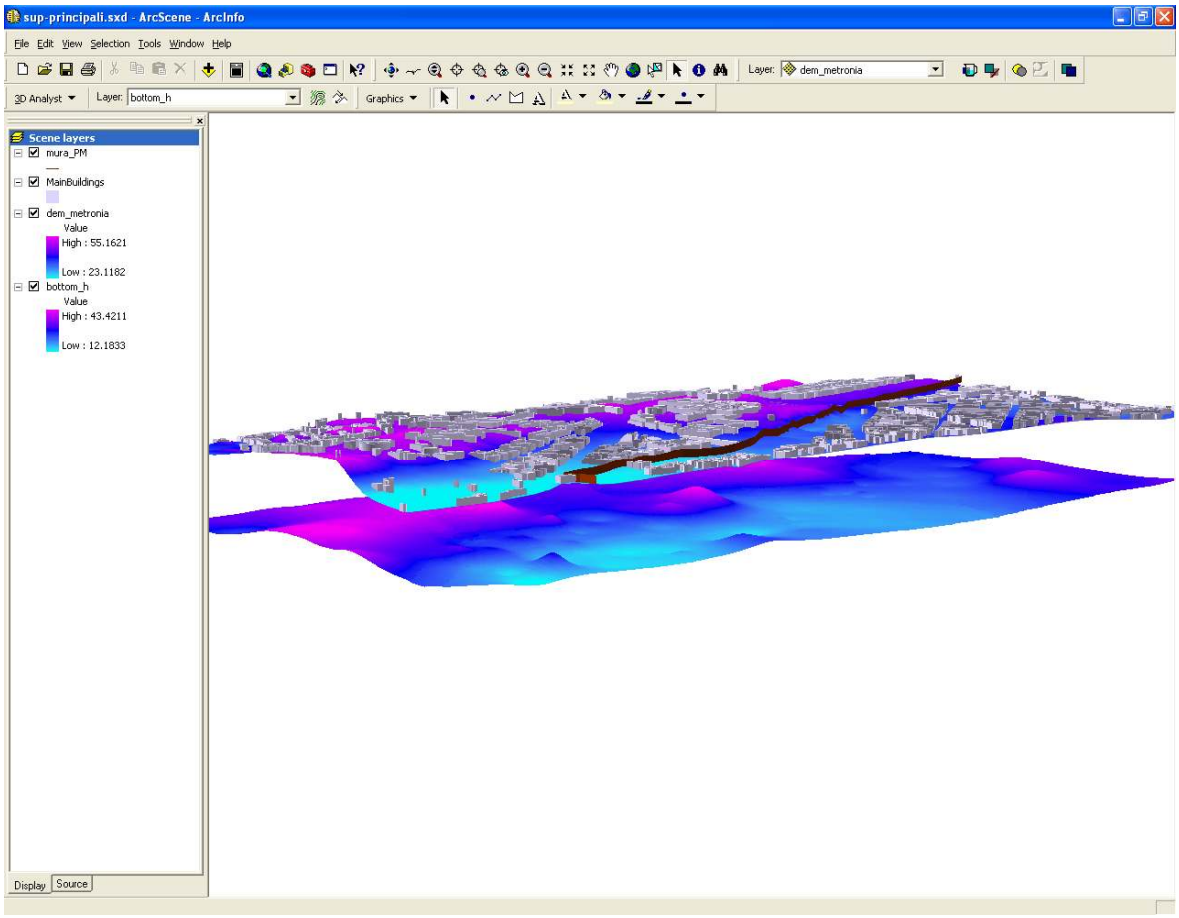


Figura 66: Visualizzazione 2.5D del DEM Cartesia (ossia tetto dei riporti) e del letto dei riporti, con esagerazione verticale pari 1:2. Oltre alla superficie topografica sono rappresentati gli edifici e le

Mura Aureliane. Le superfici stratigrafiche sono state rappresentate con un *offset* di 50 m per rendere più leggibile la visualizzazione.

In Figura 66 sono rappresentate le superfici stratigrafiche che delimitano il deposito dei terreni di riporto. Il tetto dei riporti, approssimabile nell'area di studio alla topografia (DEM Cartesia), riproduce la morfologia della valle e l'andamento dei rilievi. La superficie del letto dei riporti ripropone un andamento simile a quello del tetto: le quote più superficiali sono in prossimità delle zone più rilevate, mentre quelle più profonde lungo la valle.

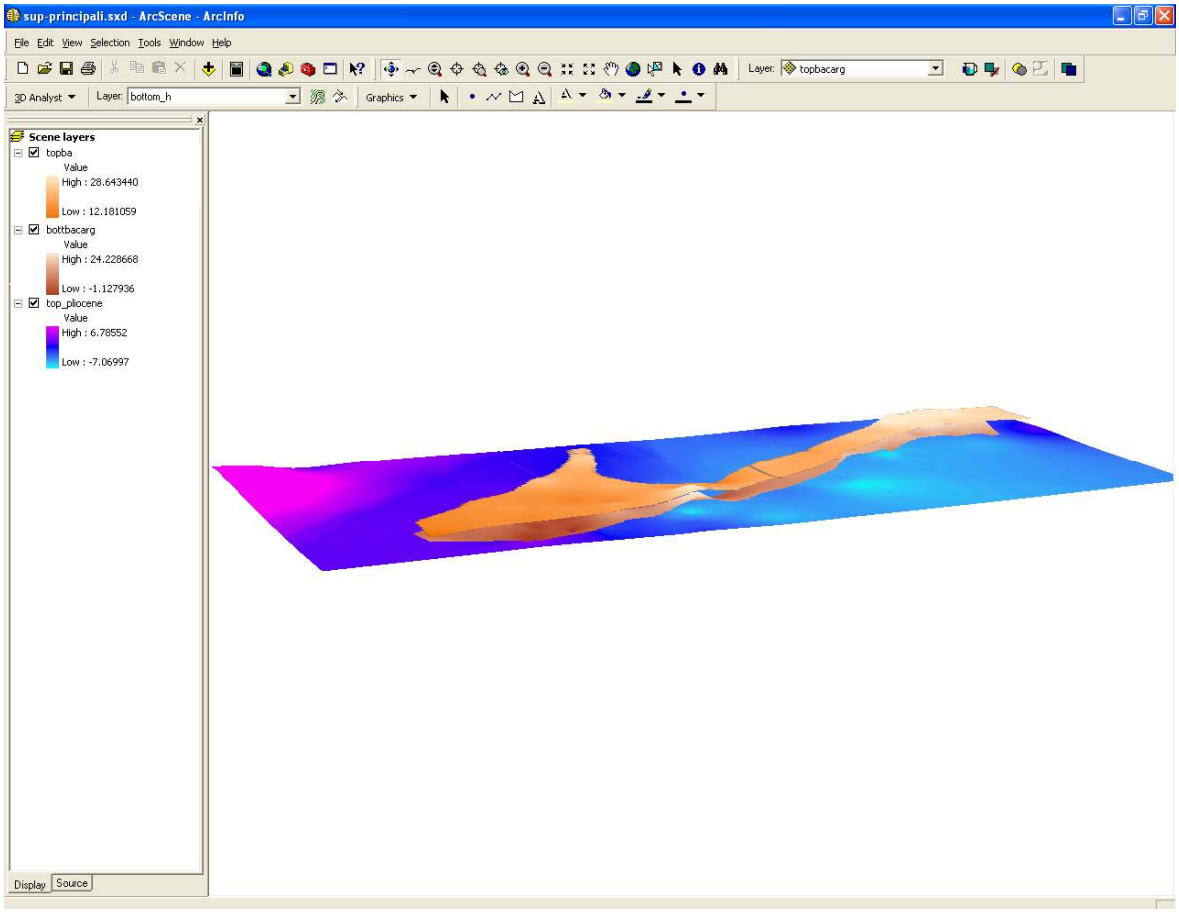


Figura 67: Visualizzazione 2.5D delle superfici stratigrafiche corrispondenti al tetto e letto delle alluvioni oloceniche (colori caldi) e del tetto delle argille plioceniche (colori freddi) con esagerazione verticale pari 1:2. Tali superfici sono rappresentate rispettando le differenze di quota reali, senza alcun *offset*.

I depositi alluvionali recenti sono visualizzati nella Figura 67 . Il tetto del deposito coincide con il letto dei riporti e i suoi limiti sono individuati dalla geologia di superficie (Funiciello & Giordano 2008). La superficie degrada dolcemente da NE verso SO, da quote pari a circa 28 metri slm fino a 12 metri slm. Il letto del deposito segue lo stesso

andamento e si approfondisce in corrispondenza della confluenza con la Vallle Murcia. Tale superficie risulta piuttosto articolata con repentini cambi di pendenza.

Nella stessa Figura 67 è visualizzato il *top* del Pliocene che degrada in modo monoclinale con pochi gradi di pendenza da NO verso SE.

Le superfici sono visualizzate mantenendo le quote reali ed si evidenzia come il fosso non si arrivato ad erodere il *bedrock* pliocenico in nessun punto. L'incisione dell'alveo avviene a spese del deposito pleistocenico della formazione di S. Cecilia (CIL). In Figura 68 si visualizza come primo livello il *top* del CIL a prescindere dalla facies. Il deposito si estende sotto tutta l'area di studio, con quote maggiori sotto i settori corrispondenti al rilievo vulcanico del Celio. Le quote inferiori si trovano in corrispondenza della valle, laddove coincide con il letto del deposito alluvionale olocenico e laddove risulta eroso. Al di sotto è presente il tetto delle ghiaie basali, coincidente con il letto delle alluvioni in corrispondenza dell'area blu scuro nella parte meridionale dell'area.

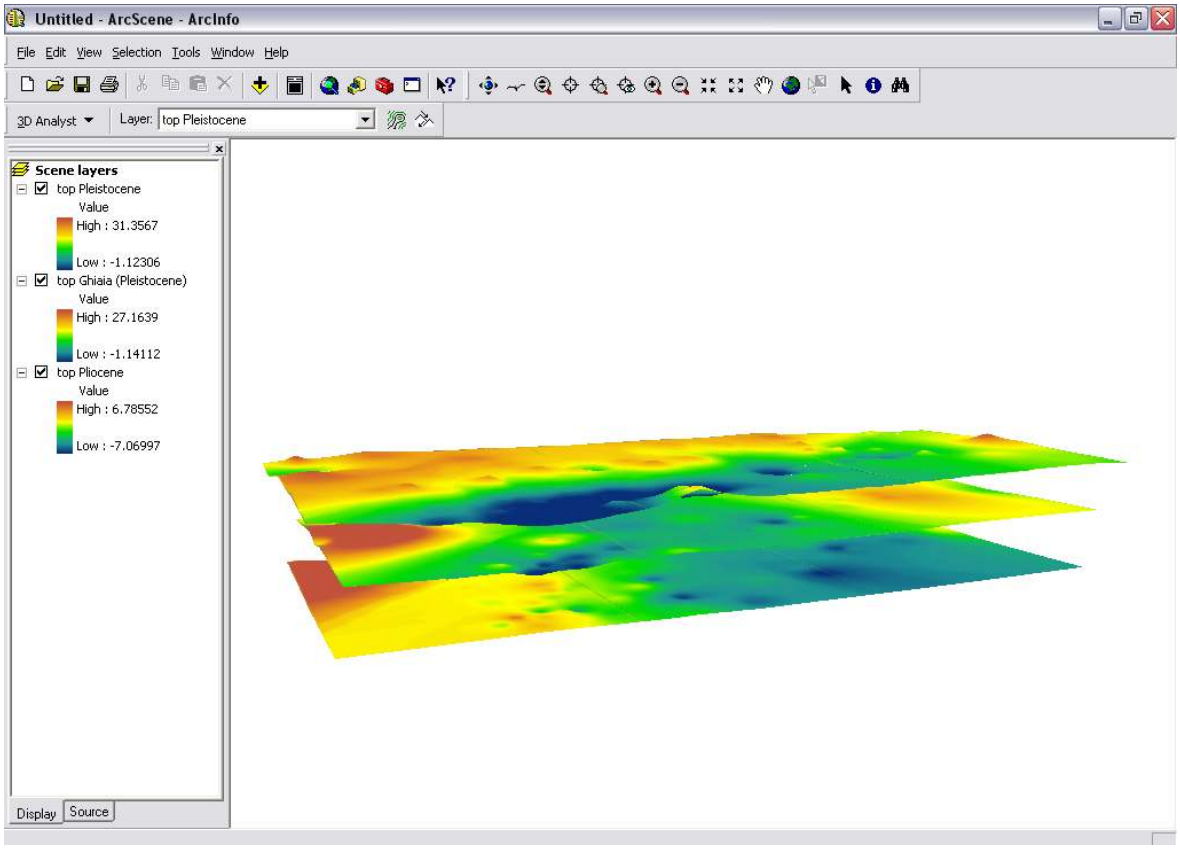


Figura 68: Visualizzazione 2.5D delle superfici stratigrafiche del ciclo deposizionale corrispondente alla Formazione di S. Cecilia (CIL) con esagerazione verticale pari 1:2. A partire dall'alto verso il basso sono visualizzati il tetto della formazione nella sua facies argilloso-sabbiosa, il tetto delle ghiaie basali (corrispondente al letto del deposito in facies argillosa) e il letto del deposito (o letto delle ghiaie), coincidente con il *top* del Pliocene. Le superfici stratigrafiche sono state rappresentate con un *offset* di 40 m per rendere più leggibile la visualizzazione.

Il livello inferiore corrisponde al letto del CIL, ossia al letto delle ghiaie basali, corrispondente al tetto del Pliocene.

9.1.4 Caratterizzazione dinamica dei terreni

Considerando l'aspetto geotecnico sismico, il contributo più peculiare dato dall'applicazione della banca dati proposta all'analisi dei depositi alluvionali della Marrana delle Acque Mariane, si sono analizzate in modo puntuale le prove *cross hole* disponibili.

Di seguito sono illustrate nella Tabella 16 con i risultati delle prove in funzione del profilo stratigrafico ottenuto dall'analisi delle carote relative ai sondaggi effettuati in corrispondenza delle prove sismiche stesse. Nella Figura 69 sono mostrati i risultati in termini di profili di onde di taglio S, v_s, di compressione P, v_p, e di modulo di taglio G, di una prova *cross hole* che caratterizza tutta la serie stratigrafica fino a toccare lo strato basale delle argille plioceniche (litotipo APL).

Per quanto riguarda la v_s il litotipo TA relativo ai riporti ha un valore medio di 211 m/s, ma assume un intervallo di valori piuttosto ampio, da un minimo di 98 m/s ad un massimo di 498 m/s. Tale variabilità è facilmente correlabile alla eterogeneità tipica dei terreni di riporto: sovente nelle aree del centro storico si rinvengono frammenti di muratura più o meno continui, alternati a depositi più limoso-argillosi poco consistenti. Per il litotipo delle argille oloceniche, LSO, i valori di v_s assumono un valore medio 251 m/s, con un minimo di 172 m/s e un massimo di 393 m/ s. Le misure di v_s sono pari a circa 327 m/s e 433 m/s, rispettivamente per la facies argilloso-sabbiosa e per quella ghiaiosa relativa al ciclo sedimentario pleistocenico.

SONDAGGIO				SN22								
FORMAZIONE	LITOTIPO	PROFONDITÀ		Vs (m/s)			Vp (m/s)			G (MPa)		
		m P.C.	m S.L.M.									
		DA/A	DA/A	min	max	M	min	max	M	min	max	M
RIPORTI	TA	0/13.7	28.8/15..2	159	309	214	311	1210	720	43	172	87
ALLUVIONI OLOCENICHE	LSO	13.7/22.4	15.2/6.5	207	254	230	808	1583	1353 (7500)	79	122	100
S. CECILIA PLEISTOCENE	G facies ghiaiosa	22.4/32.3	6.5/-3.4	334	700	523	1687	2116	1920	212	931	549
MONTE VATICANO	AFL	32.3/42	-3.4/-13									

SONDAGGIO				SN15								
FORMAZIONE	LITOTIPO	PROFONDITÀ		Vs (m/s)			Vp (m/s)			G (MPa)		
		m P.C.	m S.L.M.									
		DA/A	DA/A	min	max	M	min	max	M	min	max	M
RIPORTI	TA	0/12.6	28.9/16.3	109	321	187	276	1518	910	21	185	69
ALLUVIONI OLOCENICHE	LSO	12.6/29	16.3/-0.9	172	393	232	1211	1526	1325	53	286	105
S. CECILIA PLEISTOCENE	G facies ghiaiosa	29/31.5	-0.9/-2.6	307	--	--	1521	--	--	174	--	--
MONTE VATICANO	AFL	31.5/40	-2.6/-11									

SONDAGGIO				SN7								
FORMAZIONE	LITOTIPO	PROFONDITÀ		Vs (m/s)			Vp (m/s)			G (MPa)		
		m P.C.	m S.L.M.									
		DA/A	DA/A	min	max	M	min	max	M	min	max	M
RIPORTI	TA	0/15.2	35.4/19.5	128	297	193	291	1637	900	29	159	73
ALLUVIONI OLOCENICHE	LSO	15.8/28	19.5/7.2	225	391	308	1300	1890	1669	96	290	186
S. CECILIA PLEISTOCENE	A facies argillosa	28/33.1	7.2/2.1	266	291	280	1865	1891	1878	134	164	150
	G facies ghiaiosa	33.1/40	2.1/-4.7									
MONTE VATICANO	AFL											

SONDAGGIO				SN5								
FORMAZIONE	LITOTIPO	PROFONDITÀ		Vs (m/s)			Vp (m/s)			G (MPa)		
		m P.C.	m S.L.M.									
		DA/A	DA/A	min	max	M	min	max	M	min	max	M
RIPORTI	TA	0/16	32.6/16.5	155	342	228	411	1493	869	42	205	97
ALLUVIONI OLOCENICHE	LSO	16/26.1	16.5/6.4	194	345	261	1496	1623	1573	72	226	132
S. CECILIA PLEISTOCENE	S facies sabbiosa	26.1/31.6	6.4/0.9	367	393	377	1561	1603	1572	256	293	270
	G facies ghiaiosa	31.6/40	0.9/-7.4									
MONTE VATICANO	AFL											

SONDAGGIO				SN3								
FORMAZIONE	LITOTIPO	PROFONDITÀ		Vs (m/s)			Vp (m/s)			G (MPa)		
		m P.C.	m S.L.M.									
		DA/A	DA/A	min	max	M	min	max	M	min	max	M
RIPORTI	TA	0/14	34.8/20.4	139	498	249	319	1429	807	33	422	124 (77)
ALLUVIONI OLOCENICHE	LSO	14/16.4	20.4/18	219	232	226	1504	1660	1582	89	100	94
S. CECILIA PLEISTOCENE	S facies sabbiosa	16.4/21	18/14.4	215	417	323	1535	1715	1652	86	304	196
	G facies ghiaiosa	21/40.2	14.4/-5.8									
MONTE VATICANO	AFL	40.2/41	-5.8/-6.5									

Tabella 16: Riassunto dei risultati della prova *cross hole* in corrispondenza dei sondaggi SN22, SN15, SN7, SN5, SN3: velocità delle onde S, v_s, P, v_p, e del calcolo della rigidezza G; sono mostrati il valore minimo (min), massimo (max) e medio (M), relativo alle formazioni ed ai litotipi individuati nel profilo stratigrafico e le corrispondenti quote relative (m P.C.) ed assolute (m S.L.M.) di tetto (DA) e di letto (A).

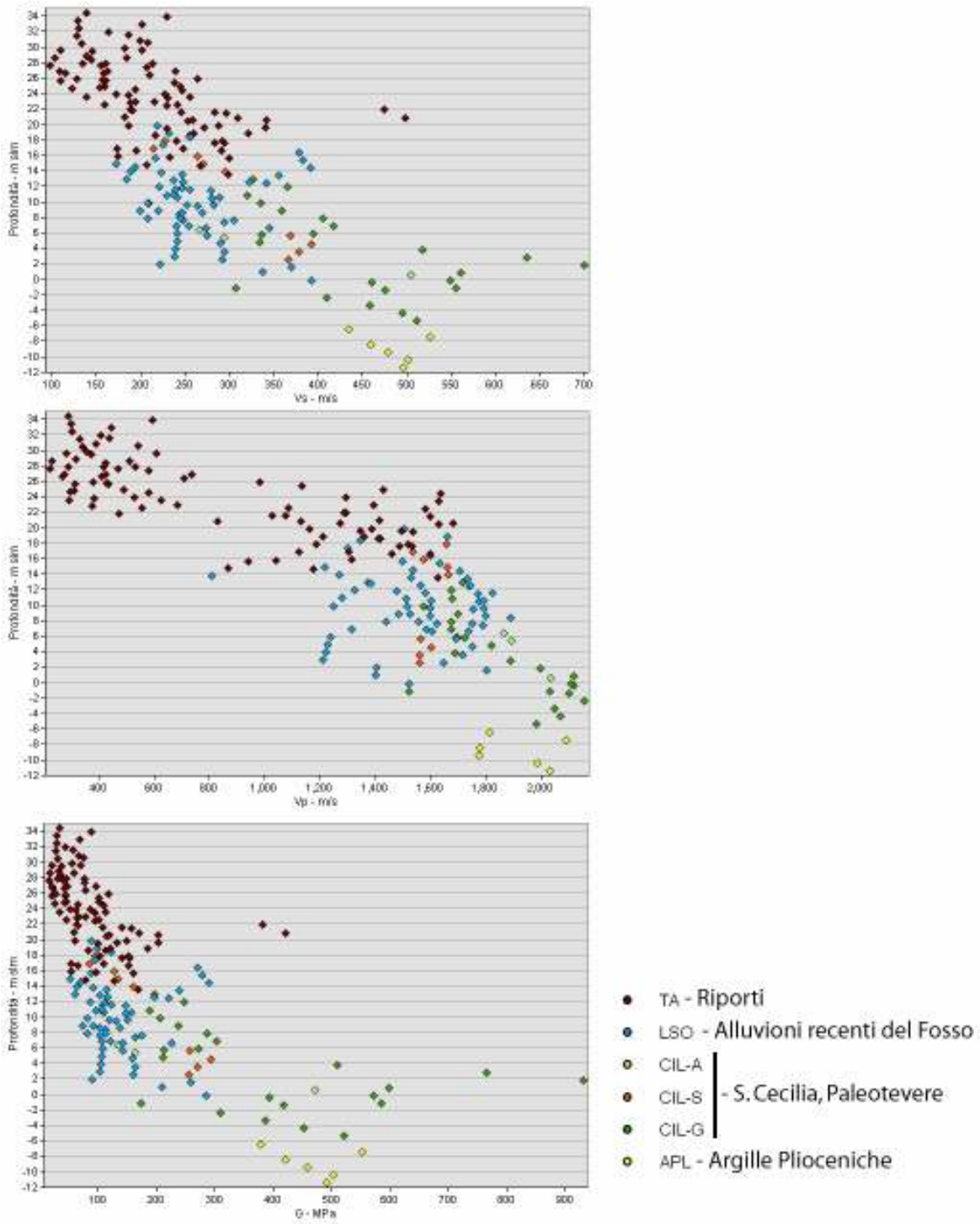


Figura 69 – Grafico (dall'alto verso il basso) delle velocità delle onde S, v_s, P, v_p, e del modulo di rigidezza G; rispetto alle profondità espressa in metri slm. I diversi risultati si riferiscono alle sei prove sismiche di tipo *cross hole* sono attribuiti al litotipo riconosciuto correlando le prove sismiche con le rispettive serie stratigrafiche.

Il *bedrock* relativamente rigido, costituito dalle argille sovraconsolidate plioceniche è attraversato solo in sondaggio (SN14), di cui si propone in Figura 70 la stratigrafia e il

risultato della prova *cross hole*. I relativi valori di v_S e v_P sono rispettivamente in media di 482 m/s, 1,911 m/s con massimi di 526 m/s, 2,090 m/s.

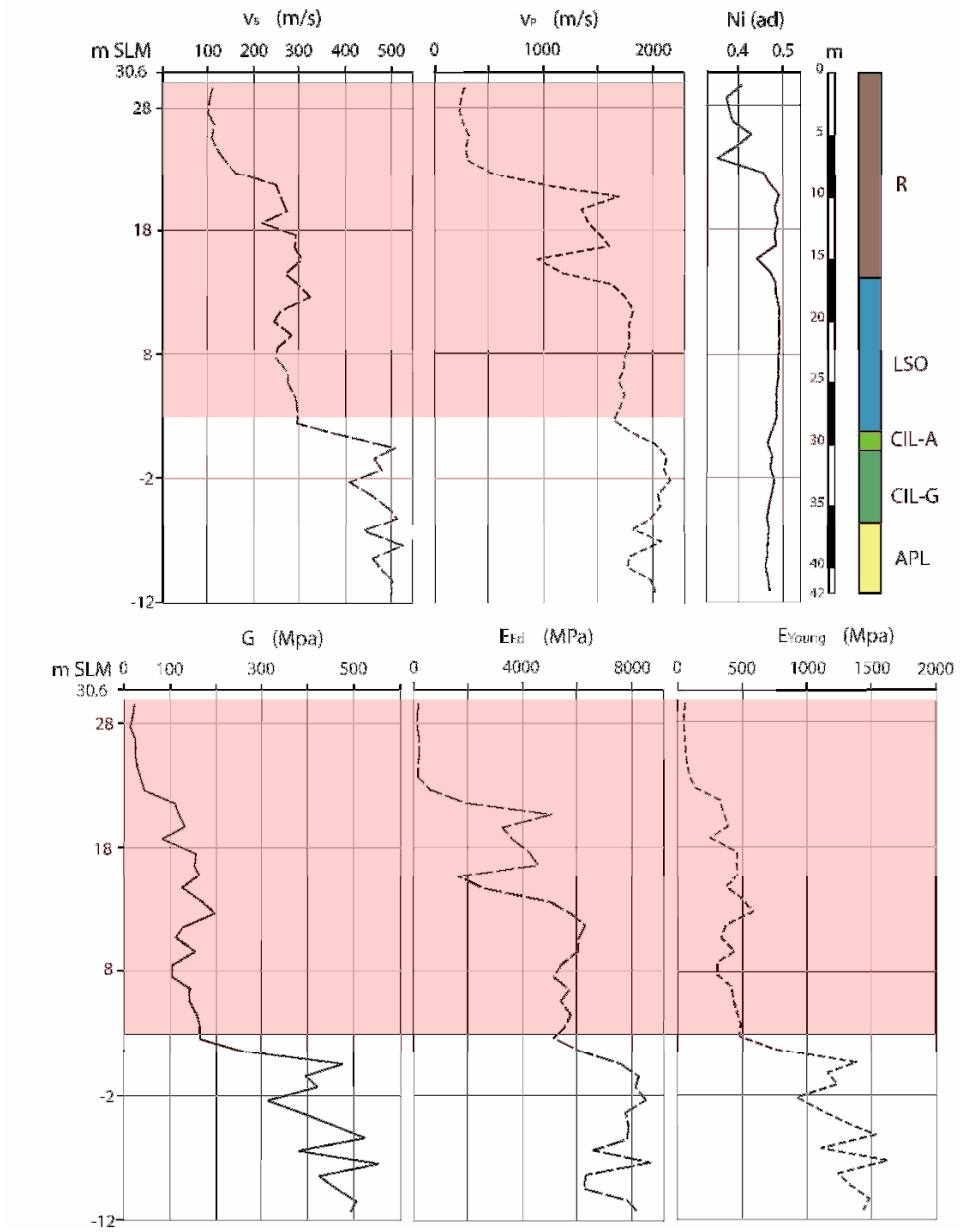


Figura 70: Profili relativi al sondaggio SN14 della velocità delle onde di volume, $\mathbf{v_S}$ e $\mathbf{v_P}$, (in alto a destra) nonché del coefficiente di Poisson **v**, con la profondità; l'area in rosso mette in evidenza l'intervallo di quote (da circa 12 a 28 m dal piano campagna) un livello a bassa velocità. Il comportamento dinamico dei terreni, rappresentato dai parametri G, E_{Ed} e E_{Young}, (grafici in basso) risulta in questa fascia non lineare e approssimativamente costante con la profondità. A sinistra la colonna stratigrafica rappresentante gli strati attraversati in corrispondenza della prova sismica in foro che caratterizza in modo completo tutto lo spessore alluvionale fino al *bedrock* pliocenico.

I parametri relativi alla deformabilità riflettono l'andamento dei profili di velocità. In Figura 70 sono rappresentati i risultati relativi alla prova sismica effettuata in corrispondenza del sondaggio SN14 che attraversa tutta la coltre dei depositi fino a raggiungere a circa 36 metri dal piano campagna, le argille plioceniche. Nei primi 28 metri

dal piano campagna, dove si individua una zona a bassa velocità (v_s comprese tra 100 e 300 m/s) si hanno valori del modulo di taglio (G) inferiori ai 200 MPa con valore medio di 150 MPa; valori del modulo di Young (E_{Young}) compresi tra 0 e i 540 Mpa con valore medio di 300 MPa; valori del modulo edometrico inferiori a 6,000 MPa e media di 3,500 MPa.

Da notare i valori relativamente inferiori delle velocità delle onde di volume nei primi 8 metri dal piano campagna, corrispondenti alla parte superficiale dei depositi antropici con v_s e v_p costanti con la profondità e rispettivamente pari a 114 e 273 m/s.

9.2 IL FOSSO DI GROTTA PERFETTA

Il Fosso di Grotta Perfetta, tributario di sinistra del fiume Tevere, oggi completamente obliterato dal tessuto urbano, si situa nel settore meridionale della città, all'altezza della Basilica di San Paolo Fuori le Mura, nel territorio del IX Municipio compreso tra la via Cristoforo Colombo ad Est e la via Ostiense ad Ovest.

Il Fosso,alla fine degli anni '40, è stato incanalato all'interno del collettore fognario che corrisponde approssimativamente a via Giustiniano Imperatore e la sua valle è stata colmata di terreni di riporto per permettere lo sviluppo urbano dell'area. Il processo di urbanizzazione, coincidente con il periodo dell'espansione edilizia post-guerra, è stato di tipo intensivo e ha determinato nell'area un'elevata densità abitativa. La maggior parte delle costruzioni sono di tipo residenziale con palazzine in media intorno agli 8-9 piani. Fin dal principio l'area ha presentato una intrinseca pericolosità associata alle scadenti proprietà geotecniche dei depositi alluvionali del Fosso. Alcuni edifici hanno mostrato problemi di stabilità appena elevati, altri hanno addirittura indotto i costruttori ad effettuare importanti varianti al progetto in corso d'opera. Sono segnalati casi di palazzine che nel corso degli anni sono state abbattute; in alcuni casi tale demolizione è dovuta all'ampliamento o alla realizzazione di edifici di nuova generazione, in altri casi si presuppone che le cause di tale scomparsa siano dovute all'abbattimento di edifici pericolanti.

Recentemente, il progressivo aggravarsi della stabilità di alcuni edifici con il conseguente peggioramento delle condizioni di sicurezza, ha portato l'Amministrazione Comunale di Roma ad emettere, nel novembre 2001 e nel novembre del 2004 ordinanze di sgombero per alcune famiglie residenti in edifici considerevolmente lesionati a causa di cedimenti strutturali sostanzialmente differenziali. Si sono attuati provvedimenti di riqualificazione urbana nell'ottica della sostenibilità e compatibilità urbanistica, intervenendo nello specifico con un programma di sostituzione edilizia.

Studi approfonditi sono stati condotti per la caratterizzazione geologica e geotecnica dei terreni alluvionali responsabili del processo di subsidenza in atto nell'area. Il problema dei cedimenti pur essendo la principale causa dei dissesti verificatisi nelle costruzioni edificate sul deposito risulta non essere l'unico. I depositi alluvionali risultano, essere sede potenziale di amplificazione delle onde sismiche in caso di eventi tellurici (Cifelli *et alii* 2000). Dal punto di vista della pericolosità geotecnica sismica, con particolare riguardo alla propensione della valle ad ospitare fenomeni di amplificazione locale, sono presenti

informazioni macrosismiche relativi al terremoto dell'Umbria Marche 1997-1998 (Donati *et alii* 2008), ma non studi di dettaglio per la caratterizzazione dinamica dei terreni alluvionali. Per tale motivo, considerando la propensione delle valli ad ospitare effetti di sito significativi (Bard & Bouchon 1985) e la pericolosità sismica non trascurabile per il Comune di Roma (classe 3, OPCM 2003, aggiornato 2006), si è condotto uno studio per la caratterizzazione geotecnica in termini di rigidezza al taglio dell'intera serie stratigrafica della valle fino al bedrock sismico costituito dalle argille plioceniche, propedeutico ad uno studio di risposta sismica locale, predisponendo un'indagine sismica in foro di tipo *cross hole*. Sono stati prelevati sei campioni indisturbati rappresentativi dei principali litotipi riconosciuti al fine di condurre una caratterizzazione dei parametri geotecnici sismici in laboratorio (i.e. prova di taglio semplice ciclico con doppio campione – DSDSS), complementari ai dati misurati in sito. Inoltre il materiale carotato è stato campionato per uno studio mineralogico oggetto di una Tesi di Laurea.

9.2.1 Morfologia e cartografia storica

Il Fosso o "marrana" di Grotta Perfetta è la porzione terminale del Fosso di Tor Carbone che si origina in tenuta Terricola a 70 m s.l.m. poco ad ovest dalla Via Appia Antica all'altezza dell'ippodromo delle Capannelle. Dalle sue sorgenti il fosso scendeva a valle verso nord senza ricevere alcun tributario di rilievo fino a confluire nel Tevere assumendo successivamente il nome di Fosso del Grottone e poi di Fosso di Grotta Perfetta. Ora il fosso è incanalato all'altezza di Piazzale del Caravaggio nel collettore primario che segue approssimativamente la direzione di Via Giustiniano Imperatore. La morfologia dell'area è tipicamente quella di una valle a V, con ai fianchi i rilievi di origine vulcanica, in prevalenza di provenienza albana, e fondovalle sub-pianeggiante colmato dai depositi alluvionali del fosso, in seguito sepolti dalla coltre dei terreni di riporto.
L'analisi di carte storiche e foto aeree a partire dal 1907 ha permesso di individuare lo sviluppo urbano dell'area nel corso degli ultimi cento anni (Fig. 71). L'analisi dell'evoluzione dell'edificato nel settore d'interesse ha messo in evidenza che la maggior parte degli stabili lesionati risulta essere stata edificata nel periodo tra il 1949 e il 1960. (Campolunghi *et alii* 2008). In particolare le palazzine sorte prima del 1949 e abbattute nel periodo tra il 1960 e il 1967 si trovavano in quella che attualmente è adibita ad area a verde pubblico lungo Via Giustiniano Imperatore (altezza incrocio con Via C. Severo).

Analogamente nel settore a nordovest dell'area degli edifici lesionati, tratto terminale di Via G. Imperatore, si sono riconosciute due palazzine sorte nel 1960 e demolite nel 1967.

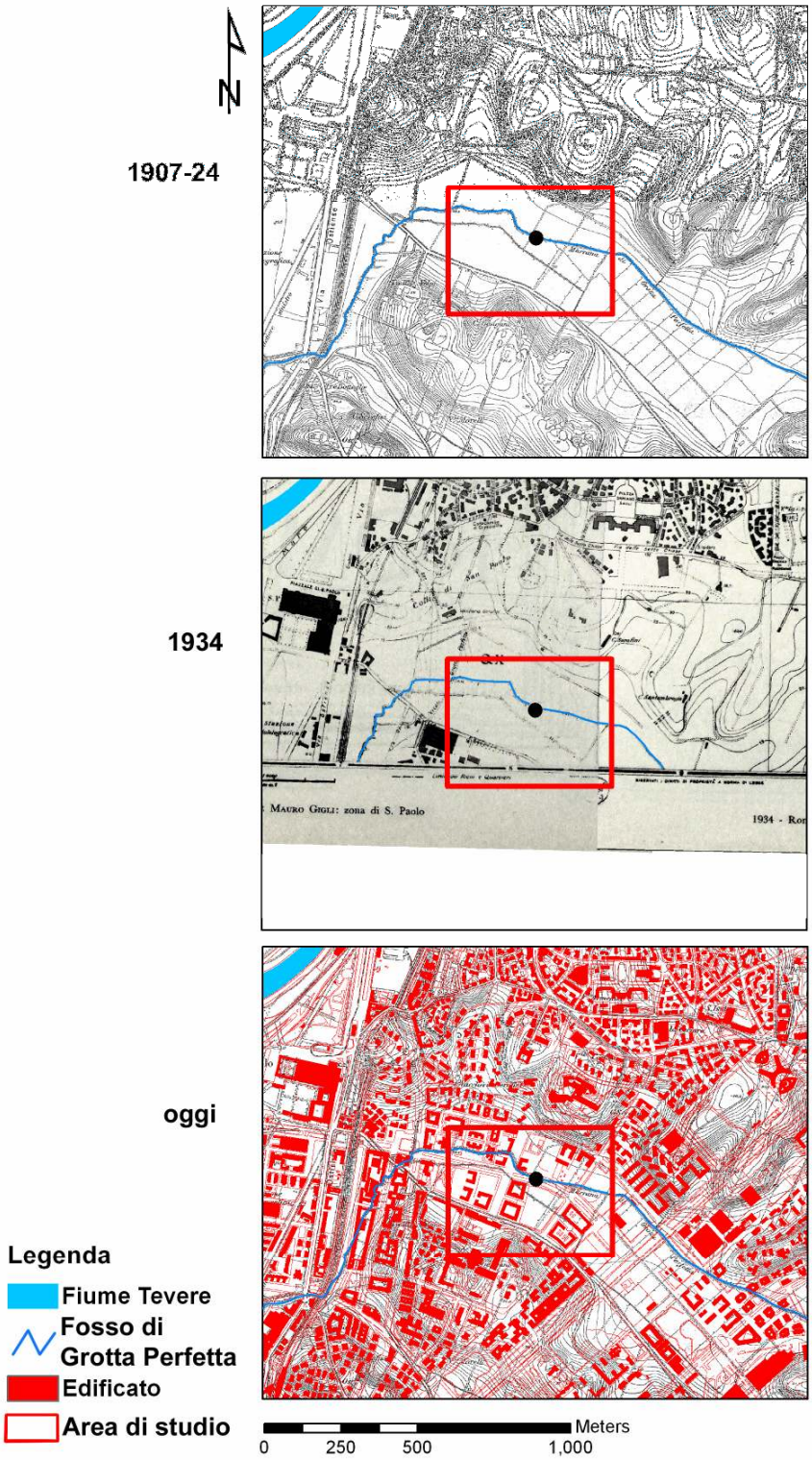


Figura 71: L'area di studio e l'ubicazione del nuova indagine di tipo *cross hole* eseguita, nelle cartografie del 1907-24, 1934. Per evidenziare come l'urbanizzazione sia avvenuta in modo intensivo lungo l'intera valle del fosso di Grotta Perfetta, sullo stralcio della cartografia del 1907 è stato riportato l'edificato (oggi, dal DB Cartesia 1999).

Sin dalle fasi iniziali, dopo i primi scavi, i costruttori che realizzarono l' urbanizzazione dell'area si trovarono ad adottare la tipologia delle fondazioni su pali, necessarie per la presenza di terreni instabili. I limiti tecnologici dei primi anni '50 non permisero la realizzazione di pali di diametro superiore a 400-500 mm e di profondità superiore a 15-20 m. Tali fondazioni si basarono su una portanza relativa alla sola resistenza laterale dei pali ("pali sospesi"), senza apporto di resistenza alla punta, sovente non arrivando ad attestarsi al di là dei depositi alluvionali di fosso, nel bed-rock rigido plio-pleistocenico. Attualmente sono diversi i palazzi con lesioni dovute a cedimenti differenziali e per alcuni di essi è stata avviata una procedura di sostituzione edilizia nell'ambito di un progetto più ampio di riqualificazione ambientale e riorganizzazione degli spazi e servizi pubblici.
L'urbanizzazione intensiva ha modificato sostanzialmente l'assetto idrogeologico e topografico dell'area occupata dal paleofosso di Grotta Perfetta e l'applicazione di carichi litostatici, legati alle trasformazioni urbanistiche (messa in posto di terreni di riporto e costruzione di edifici) ha determinato un incremento dei cedimenti già presenti per il processo di consolidazione naturale dei terreni argilloso-torbosi alluvionali (Campolunghi *et alii* 2008).

9.2.2 Informazioni del sottosuolo

Le informazioni del sottosuolo relative alla paleovalle del Fosso di Grotta Perfetta sono riferibili ai lavori di Campolunghi *et alii*. (2004, 2007, 2008). I dati stratigrafici raccolti e la caratterizzazione fisico-meccanica delle unità che compongono il corpo alluvionale del Fosso di Grotta Perfetta sono di natura bibliografica e vengono illustrati nei seguenti paragrafi. I dati geologici di superficie sono relativi alla nuova cartografia geologica di Roma (Funiciello & Giordano 2008). I dati stratigrafici e geotecnici bibliografici sono stati integrati con la caratterizzazione dinamica delle unità in seguito ai risultati ottenuti dalla prova sismica in foro di tipo *cross hole* (ubicazione in Fig. 74), finanziata e seguita dal Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università di Roma Tre, con prelievo di campioni indisturbati, per prove di geotecnica sismica in laboratorio, e disturbati, per la determinazione della composizione mineralogica. In questa Tesi vengono illustrati i risultati relativi all'indagine sismica in foro in termini di deformabilità e proprietà dei terreni nel campo delle piccole deformazioni. La parte di laboratorio è pertinente ad uno studio di geotecnica sismica in collaborazione con la Facoltà di

Ingegneria della Sapienza di Roma per la caratterizzazione ciclica dei depositi argillosi ricchi in materia organica, parte di un approfondimento futuro..

9.2.2.1 *Dati ed interpretazione stratigrafica*

Le alluvioni oloceniche si sviluppano dal piano campagna fino a circa 45-50 m di profondità (da 14.5 m slm a – 30 m slm). Inferiormente sono presenti le ghiaie di base legate alla fase erosiva (spessore 3-5 m) del Fosso di Grotta Perfetta e il tetto delle argille plioceniche localizzato, nel fondovalle, a -35 m slm con quote che aumentano risalendo verso i versanti sepolti fino a –10/-15 m slm. Al di sopra di tale quota ed in corrispondenza dei rilievi collinari che bordano la valle di Grotta Perfetta, sono presenti i depositi della ciclo deposizionale della Formazione di S. Cecilia (ghiaie, sabbie ed argille) che affioravano sulla parte alta dei versanti della paleovalle, fino alla sommità dei rilievi collinari che arrivano fino a 35-40 m slm. Tali depositi sono costituiti da una unità caratterizzata da ghiaie sabbiose e da argille grigiastre e da un'unità caratterizzata da sabbie limose giallastre con spessore totale intono a 10-15 m (tetto a circa 0/+5 m slm).
La Figura 72 mostra una sezione geologica trasversale alla valle del Fosso di Grotta Perfetta, rappresentativa dell'assetto stratigrafico e con l'indicazione delle varie unità alluvionali sopra descritte.

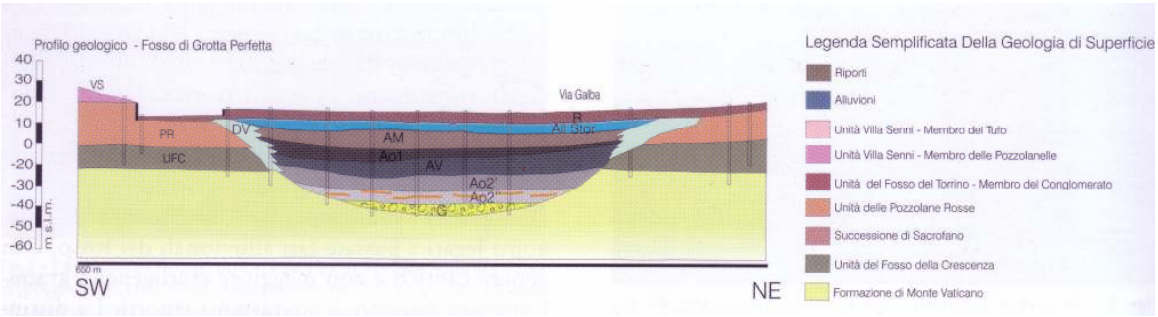


Figura 72: Sezione geologica trasversale alla Vale del Fosso di Grotta Perfetta (da Campolunghi *et alii* 2008).

Gli spessori delle unità alluvionali e la morfologia del bedrock pliocenico possono variare sensibilmente a seconda della porzione di valle considerata, presentandosi costanti prevalentemente lungo l'asse della valle stessa.

Le formazioni geologiche affioranti, al di sotto della coltre dei riporti, sono individuabili a partire dallo strato informativo del *geodatabase*, **GARG_map**, e sono, dal più in alto topograficamente (Fig. 73):

1. Tufo di Villa Senni: membro delle Pozzolanelle (VSN2) e membro del Tufo Lionato (VSN1), unità vulcaniche albane che costituiscono la successione ignimbritica relativa all'ultima fase eruttiva, con messa in posto di grandi volumi di materiale dal complesso del Vulcano Laziale (Pleistocene medio).
2. Pozzolane Nere (PNR): deposito ignimbritico massivo, non consolidato di colore nero, costituito da scorie, lapilli grossolani, blocchi vulcanici e xenoliti intrusivi termometamorfosati (Pleistocene medio).
3. Fosso del Torrino, membro del Conglomerato Giallo (FTR1): conglomerato poligenico fluvio-lacustre, poco stratificato, di origine vulcanoclastica, costituito dal rimaneggiamento dei depositi ignimbritici primari dei Colli Albani e Sabatini, con abbondanti scorie gialle e rosse; a luoghi livelli di sabbia, argilla calcarea e travertino fitoclastico (Pleistocene medio).
4. Pozzolane Rosse (RED): deposito vulcanico massivo e caotico, non consolidato, costituito da scorie scure da poco a moderatamente vescicolate relative all'attività piroclastica del vulcano dei Colli Albani (Pleistocene medio).
5. Formazione di Valle Giulia (VGU): conglomerati poligenici fluviali, costituiti da alternanze di livelli sub-orizzontali di natura calcarea, travertinoide, nonché da materiale vulcanoclastico (Pleistocene medio).
6. Infine il deposito delle alluvioni recenti (ba), costituito da alternanze di argille, limi, sabbie e ghiaie, spesso ricche in materia organica e materiale vulcanoclastico, relativo alla sedimentazione del Fosso di Grotta Perfetta che ha inciso profondamente i depositi vulcanici e sedimentari pleistocenici (Olocene).

Al di sotto della Formazione di Valle Giulia e di quelle vulcaniche si trova un ciclo deposizionale completo relativo alla sedimentazione del Paleotevere, individuabile con la Formazione di Santa Cecilia, sabbie, argille e ghiaie relative alla prima fase eruttiva del Vulcano Laziale, con presenza di elementi vulcanici e ciottoli calcarei ben arrotondati di origine appenninica. La sequenza stratigrafica si chiude verso il basso con le argille marine plioceniche della Formazione di Monte Vaticano, non affioranti in questo settore.

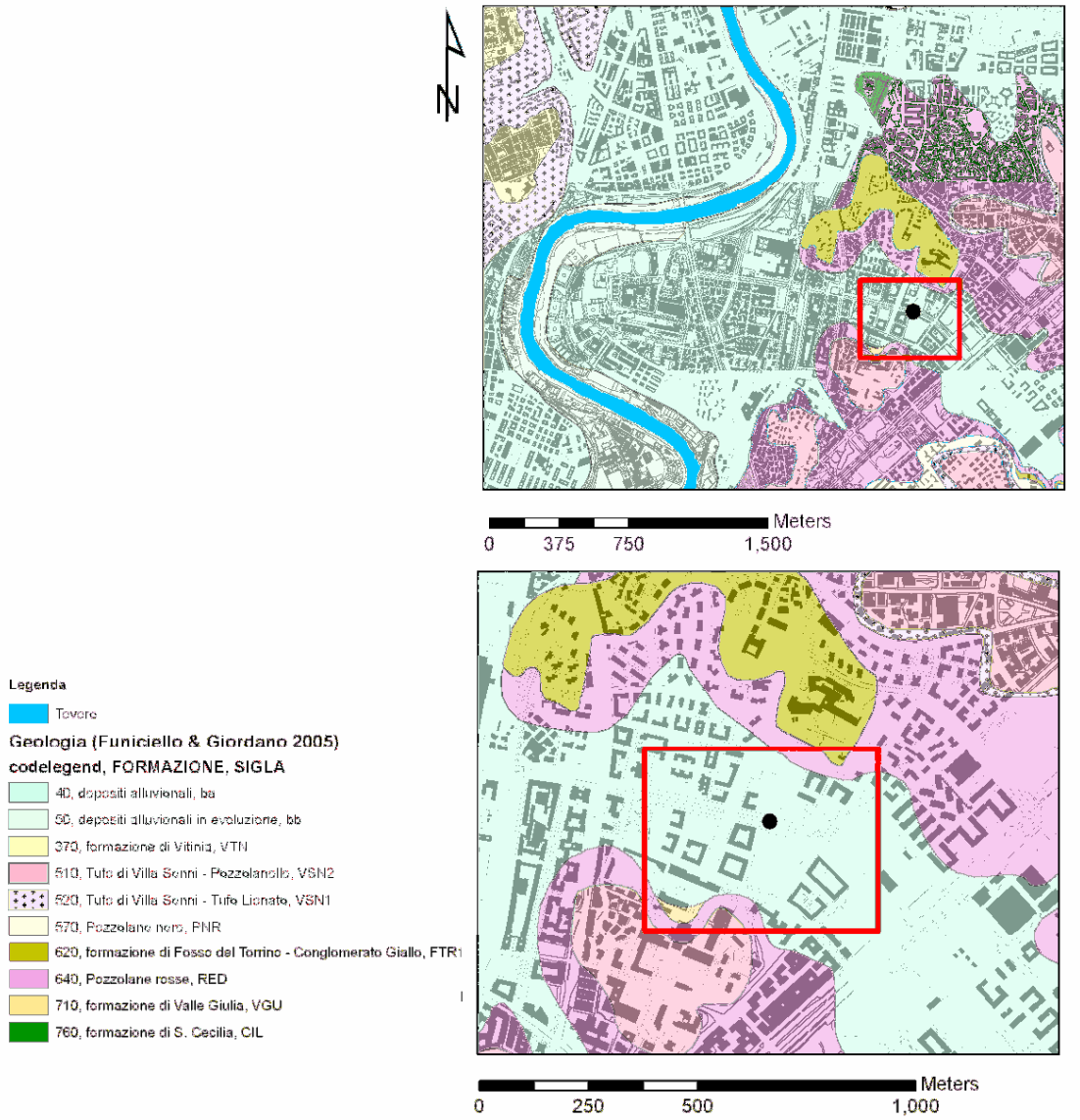


Figura 73: Carta geologica dell'area di studio (riquadro in rosso) con ubicazione dell'indagine *cross hole*, a scale di differente dettaglio.

L'assetto stratigrafico del deposito alluvionale recente è piuttosto complesso. In esso, per uno spessore massimo di 50 metri, si riconoscono, al di sotto della coltre dei riporti, una serie di depositi riconducibili a diverse fasi evolutive del fosso, legati ad ambienti di energia variabile. Il deposito alluvionale del Fosso di Grotta Perfetta può essere suddiviso nelle seguenti unità deposizionali caratterizzate da diverse caratteristiche fisico-meccaniche (Campolunghi *et alii* 2004), a partire dall'alto verso il basso (Fig. 74a):

1. Alluvioni storiche – **All stor**

La coltre superficiale dei depositi alluvionali del fosso è costituita da sabbie limose con sparsi elementi lapidei e orizzonti pozzolanacei fluitati che sono attribuibili alle fasi di alluvionamento in epoca storica. Si ritrovano spesso elementi di origine antropica fluitati in ambiente subaereo-subacqueo e livelli pedogenizzati legati alle passate attività agricole. L'assetto tessiturale è in genere caotico e con maggiore eterogeneità granulometrica rispetto ai sovrastanti riporti, ma a luoghi può presentare orizzonti ben riconoscibili, legati a passate fasi alluvionali del fosso. La distinzione fra le alluvioni storiche ed i soprastanti riporti non è sempre immediata e evidente. Lo spessore di questo deposito è di circa 5-6 m.

2. Argille marroni – **AM**

Argilla più o meno limosa di colore marrone, localmente con screziature grigiastre e/o violacee; sono presenti frequenti e minuti elementi piroclastici, nonché concrezioni carbonatiche alterate. Al tetto si riconoscono delle vene irregolari dovute a processi locali di ossidazione associate ad una maggiore consistenza dei depositi argillosi, imputabile a processi di indurimento per essiccazione per esposizione superficiale o in prossimità della superficie. Lo spessore totale è di circa 7-10 m.

3. Argilla nerastra organica – **AO1**

Tale deposito è caratterizzato da una prevalente frazione limo-argillosa, con diffuso e abbondante contenuto organico - torboso che determina una colorazione nerastra - brunastra ed un odore acre; frequentemente si rinvengono minuti resti vegetali lignitificati. Lo spessore è di circa 3-5 metri.

Le argille di tale unità sono caratterizzate da una bassissima consistenza e da elevata umidità.

La sostanza organica, raramente presente in livelli e orizzonti isolati, è diffusa prevalentemente nella massa in forma colloidale. Questi aspetti individuano un ambiente di deposizione di tipo decisamente lacustre-palustre a bassissima energia e condizioni ambientali di tipo riducente; si sono valutati in laboratorio contenuti in sostanza organica fino a 15-25% (Campolunghi *et alii* 2008).

4. Argilla verdastra – **AV**

Da argille ad argille limose poco consistenti, caratterizzate da una prevalente colorazione verdastra, con un certo contenuto in carbonati (reazione all'HCl, Campolunghi *et alii* 2008), con plaghe irregolari dovute a processi locali di ossidazione ("fiamme grigiastre") e diffusi livelletti brunastri e nerastri, prevalentemente al tetto ed al letto; a differenza degli strati superiori e inferiori (**AO1** e **AO2**), il contenuto organico è assente o comunque molto limitato, probabilmente connesso ad un locale cambiamento delle condizioni paleoambientali, deposizionali o di energia dell'ambiente. Lo spessore è abbastanza omogeneo intorno ai 6-8 metri.

Detriti di versante fluitati – ***Dv***

Verso i margini del bacino la successione olocenica sin qui descritta (AM, AO1, AV) presenta delle significative eteropie; i sedimenti lacustri-palustri acquistano caratteri più grossolani ed eterometrici per gli apporti eluviali e colluviali di versante, rimaneggiati nel bacino stesso durante le fasi di sedimentazione.
Litologicamente si individuano elementi eterometrici di natura essenzialmente tufacea e/o sabbiosa, provenienti dai rilievi collinari, in una matrice limo-argillosa con variabile contenuto in sostanza organica.

5. Depositi Argillosi nerastri-grigiastri – **AO2** (sottounità AO2', AO2")

Il deposito **AO2** rappresenta la parte basale del corpo alluvionale olocenico con spessore variabile da 10 a 14m; per le differenti caratteristiche granulometriche, cromatiche e geotecniche si sono riconosciute due sottounità. Il letto di tale unità è a circa 43 m di profondità (-30 m s.l.m.) nel settore centrale del Fosso di Grotta Perfetta.
La prima unità superiore **AO2'** è costituita da limi argillosi con colorazione decisamente nerastra per l'abbondante contenuto organico, dello spessore di circa 5-6 m, simile ai sovrastanti strati organici **AO1**; la seconda unità inferiore **AO2"** di spessore maggiore (circa 7-8 m) è di colorazione più frequentemente grigiastra e presenta frequenti intercalazioni di livelli pozzolanacei e ghiaiosi di spessore da decimetrico a metrico (localmente di 3-5 m).
L'unità **AO2'** è a bassa consistenza come le unità **AV** e **AO1**, mentre passando verso la sottostante sotto-unità **AO2"** la consistenza aumenta via via, dovuta sia al carico litostatico e sia alla funzione drenante degli orizzonti pozzolanacei grossolani fluitati.

Gli strati grossolani intercalati in **AO2"** sono costituiti prevalentemente da elementi pozzolanacei sub-arrotondati con sparsi elementi calcarei arrotondati.

6. Ghiaie sabbiose – **G**

La base del fosso è riempita da uno strato di ghiaie sabbiose di origine carbonatica ed elementi arrotondati, con locale apporto di elementi tufacei arrotondati. Le ghiaie, che sono legate alla fase erosiva della paleofosso, sono presenti nel centro valle con spessori variabili da 3 a 5 m.

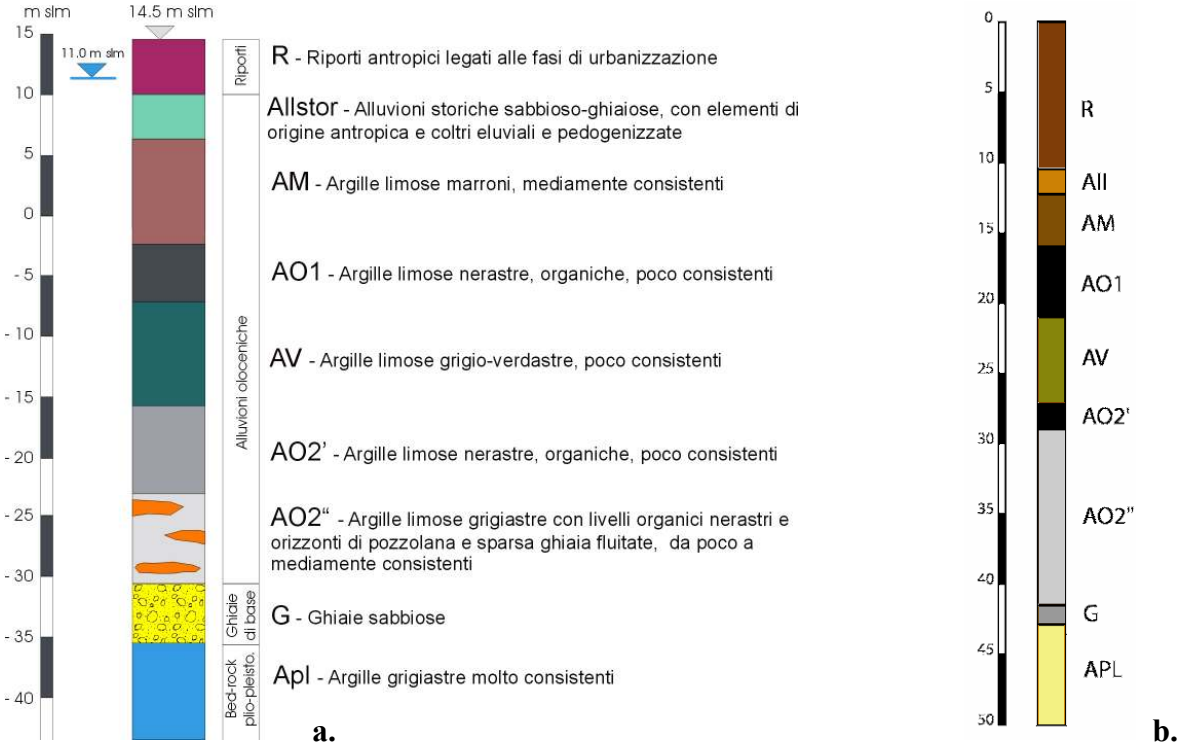


Figura 74: **a.** Serie stratigrafica rappresentativa dell'intero corpo alluvionale del Fosso di Grotta Perfetta fino al basamento rigido costituito dalle argille plioceniche (Apl) della Formazione di Monte Vaticano; **b**. serie stratigrafica relativa all'ubicazione della prova sismica in foro di tipo *cross hole* (vedi Figura); le due serie stratigrafiche sono rappresentate a scala diversa.

In particolare nel sito in cui è stata ubicata la prova geofisica *cross hole*, si sono interpretati i due sondaggi a carotaggio continuo corrispondenti ai fori in cui successivamente sono state calate le strumentazioni per l'energizzazione e per la registrazione del segnale durante la prova. Gli strati riconosciuti sono correlabili integralmente alle unità del corpo alluvionale del paleofossi (Fig. 75b) e sono così descritti ed individuati: dal piano campagna fino ai 10.50 metri si ritrovano terreni di riporto granulometricamente eterogenei, con presenza di laterizi ed elementi tufaceo-pozzolanacei (R); dai 10.50 fino ai

12.30 metri si individua un livello di argilla limosa poco consistente fluitati, riconducile all'unità delle alluvioni storiche (All); dai 12.30 ai 16 metri è presente un deposito di argilla limosa di colore marrone scuro in cui si riconosce uno scheletro di sabbia grossolana e ghiaino (AM); dai 16 ai 21 metri si incontrano le argille organiche (AO1) di colore nerastro, molto compressibili, umide e poco consistenti; dai 21 ai 27.20 metri si trovano le argille verdi (AV), molto simili alle argille AO1, ma con materia organica praticamente assente; di seguito ricompare un deposito di argille organiche (AO2"), esteso fino a 29 metri dal piano campagna. A questa quota inizia a diventare dominante la componente pozzolanacea che costituisce lo scheletro dell'unità AO2", immersa in un amatrice limoso argillosa, e con la profondità diminuisce la componente organica fino ad essere assente a quota 41.50 metri. Lo strato successivo da 41.50 fino a 42.90 metri è costituito da una ghiaia calcarea immersa in una matrice sabbiosa grossolana ricca in elementi vulcanici e coriacei (G). Al di sotto di tali ghiaie e fino alla quota di 50 metri di fine sondaggio, si riconoscono la formazione di Monte Vaticano, nella sua facies limoso argillosa di colore grigio azzurro, molto compatta e consistente.

9.2.2.2 *Caratterizzazione geotecnica in condizioni statiche*

Molteplici studi condotti sul territorio attraversato dal Fosso di Grotta Perfetta, in corrispondenza dell'attuale Via Giustiniano Imperatore hanno consentito di parametrizzare le varie unità presenti nel deposito alluvionale e le "argille Plioceniche" sovraconsolidate costituenti il bedrock al fine di individuare con dettaglio, le implicazioni geologico – geotecniche legate ai fenomeni di subsidenza precedentemente accennati.

Le caratteristiche fisico-meccaniche sono state definite attraverso prove di laboratorio e sono inoltre controllati e verificati in sito attraverso l'analisi delle prove penetrometriche dinamiche (SPT), statiche (CPT) e di una serie di prove scissometriche in foro (Campolunghi *et alii* 2004, 2007, 2008).

Di seguito sono riassunte le caratteristiche fisico meccaniche salienti delle unità deposizionali che costituiscono il corpo alluvionale olocenico del fosso (Campolunghi *et alii* 2007) e delle formazioni costituenti il bedrock plio-pleistocenico, fatta eccezione per le formazioni vulcaniche e le alluvioni antiche del Paleotevere (Tabelle 17-18).

Sigla del litotipo parametrizzato	*R*	*All stor*	*AM*	*AO1*	*Dv*
Peso di volume – γ (kN/m³)	15.6-19.6	16.8-19.1	14.3-18.8	11.5-14.8	16-18
Umidità naturale – Wn (%)	28.9-44.5	32.4-50.7	33.5-86.3	91.0-186.1	33.6-52.6
Limite liquido - LL (%)	ND – 48.3	-----	51.3-123.7	102.8-171.3	47-73
Indice plastico – Ip	NP – 15.6	-----	9.90-58.20	30.8-93.9	5-45
Indice di consistenza - Ic	0-0.7	-----	0.30-0.80	0.20-0.53	0.45-1.4
Angolo di attrito – φ' (°)	17-44	35-47	24.0-30.63	13-29	14-29
Coesione drenata – C' (kPa)	0-30	0-40	0-35	0-25	7-37
Coesione non drenata – Cu (kPa)	-----	-----	15-27	16-61	-----
SPT – N (n. colpi/30 cm)	5-9	6-8	-----	-----	-----
Modulo di deformabilità – E (kPa) (stimato da SPT)	5000-10000	4000-7000	-----	-----	-----
Modulo edometrico – Eed (kPa)	-----	-----	2870-5850	1050-1320	-----

Tabella 17: Principali parametri fisico-meccanici determinati attraverso prove di laboratorio ed in sito relativamente alle unità *R* (riporti), *All stor* (Alluvioni storiche), *AM* (Argille Marroni), *AO1* (Argille organiche nerastre) e *Dv* (depositi di versante), da Campolunghi *et alii* 2008 (modificata).

Sigla del litotipo parametrizzato	*AV*	*AO2*		*G*	*Apl*
		AO2'	*AO2"*		
Peso di volume – γ (kN/m³)	12.3-16.7	11.7-17	13.9-18.2	19	19.5-21.3
Umidità naturale – **Wn** (%)	49.30-160.10	48.2-192.6	31.7-101.3	-----	17.3-23.0
Limite liquido - **LL** (%)	44.30-168.0	62.4-164.8	53.7-128.8	-----	-----
Indice plastico – **Ip**	13.7-48.4	18.4-76.3	14.6-51.0	-----	-----
Indice di consistenza - **Ic**	0.30-0.80	0.20-0.80	0.40-1.56	-----	1.1-1.36
Angolo di attrito – **φ'** (°)	12.27-25.0	17-32	26-28	35	20-24
Coesione drenata – **C'** (kPa)	0-25	0-25	0-20	-----	30-60
Coesione non drenata – **Cu** (kPa)	2-19	15-36	12-25	-----	170-250
Modulo edometrico – **Eed** (kPa)	1300-1810	2610-3380	7640	-----	-----
Modulo di deformabilità – **E** (kPa)	-----	-----	-----	50000	-----
Indice di compressibilità **Cc**	-----	-----	-----	-----	0.04-0.21

Tabella 18: Principali parametri fisico-meccanici determinati attraverso prove di laboratorio ed in sito relativamente alle unità *AV* (Argille verdi), *AO2 e sottounità AO2', AO2"* (rispettivamente Argille organiche simili a AO1, argille con scheletro pozzolanaceo), G (Ghiaie basali sabbiose) e *Apl* (Argille plioceniche), da Campolunghi *et alii* 2008 (modificata).

Dall'analisi dei dati geotecnici, presentati nei lavori di Campolunghi *et alii*, a partire dal 2004, si individua alla profondità critica di circa 15 a 30 m dal piano campagna (-1/-13 m slm), il comportamento fisico - geomeccanico più scadente. A tale quota corrispondono gli

strati delle unità AO1 e AV: presentano caratteri fisici fortemente anomali (contenuto d'acqua naturale Wn = 100-200%; peso di volume naturale γ = 12-14 kN/m^3; indice dei vuoti e = 2.5-4.5) ed i valori di Umidità sono sistematicamente superiori ai Limiti Liquidi, con conseguenti indici di consistenza molto bassi e negativi (Ic <1) che ne determinano un comportamento metastabile, in parte connesso alla presenza di abbondante materia organica.

Ad esclusione dello strato AV, le unità deposizionali sono caratterizzate da un abbondante contenuto in sostanza organica che determina nei sedimenti la varietà di colore dal grigio-scuro fino a toni decisamente nerastri, con aspetto tipicamente torboso e con parti vegetali macroscopiche. La sostanza organica varia da poche unità percentuali fino al 25% in peso e localmente è presente in orizzonti con valori superiori al 30 – 35%.

Dal punto di vista delle proprietà geomeccaniche, alla quota assoluta compresa tra 0 e i -15 metri slm si verificano i valori minimi o pressocchè nulli di resistenza al taglio, sia in termini di angolo di attrito (φ' = 12° - 25°) sia di coesione drenata (C'=0 - 20 kPa) e non (Cu = 10-30kPa). Nello stesso intervallo di quote, i parametri di deformabilità, espressi con i Moduli Edometrici corrispondenti alle tensioni attualmente agenti in sito, danno valori minimi variabili da 1000 a 3000 kPa. Il comportamento reologico delle unità AO1 e AO2" risulta di tipo parzialmente viscoso, evidenziato dall'andamento non rettilineo della curva di compressione vergine. I parametri edometrici individuano sempre terreni ad elevata deformabilità soprattutto in corrispondenza degli strati AO1, AV e AO2'; mentre le unità AO1 e AO2' sono ricchi di materia organica in forma colloidale, l'eccezione è rappresentata dalla Unità litotecnica AV ove si riscontra una elevata deformabilità in assenza di sostanza organica (Campolunghi *et alii* 2008).

La caratterizzazione geotecnica dei depositi alluvionali ha permesso di stabilire che questi terreni presentano una elevata deformabilità ed una bassa resistenza al taglio prevalentemente dovuta all'alto valore di umidità conseguente all'alto contenuto di sostanza organica presente nelle due unità AO2' e AO1 che sono presenti senza soluzione di continuità su due livelli nel deposito ognuna con uno spessore medio di circa 5m. L'elevato contenuto di sostanza organica influenza in modo significativo le caratteristiche fisiche e meccaniche dei depositi limo-argillosi (Malkawi *et alii* 1999).

Tali terreni sono sottoconsolidati e a prescindere dai carichi indotti dalle urbanizzazioni (edifici, rilevati stradali), essi sono ancora in via di consolidazione e soggetti a una generale subsidenza. Questa situazione non è generalizzabile a tutti i depositi alluvionali

olocenici dell'area romana; in effetti i depositi alluvionali argilloso-limosi della valle tiberina, depostesi nelle stesse epoche di quelle del Fosso di Grotta Perfetta, sono caratterizzati da parametri relativamente migliori e da stati normalconsolidati (Bozzano *et alii* 1997, Corazza *et alii* 1999, Funiciello *et alii* 2004).

9.2.3.3 *Caratterizzazione geotecnica in condizioni dinamiche*

Considerando la caratterizzazione geotecnica in condizioni statiche e quindi le proprietà fisico – meccaniche delle unità litotecniche che costituiscono il deposito alluvionale di Grotta Perfetta, emerge un aspetto particolarmente importante da determinare e che riguarda la possibilità di amplificazione sismica di tali terreni: infatti la presenza di depositi plastici, a bassa densità, contenuti entro le formazioni plio-pleistoceniche più rigide determinano una forte differenza di impedenza sismica, alla base di fenomeni di amplificazione delle accelerazioni sismiche e di una maggiore durata del segnale sismico all'interno della valle alluvionale olocenica.

Nelle fasi iniziali di analisi della risposta locale di un sito è prioritario, contestualmente alla ricostruzione stratigrafica e delle geometrie dei depositi, definire le proprietà geotecniche del terreno in condizioni dinamiche: la rigidezza al taglio (G) ed il fattore di smorzamento (D). Attraverso la prova *cross hole* eseguita si è potuto determinare nel campo delle piccole deformazioni ($\gamma<1\cdot10^{-4}$ %) il modulo di taglio (G), il modulo di deformazione di Young (E), il modulo edometrico (E_{Ed}) ed il coefficiente di Poisson (ν), calcolati a partire dalla velocità delle onde di volume e del peso di volume (APPENDICE II).

Analizzando i dati di velocità in funzione della profondità ed in particolare quelli relativi alle onde di taglio S, riconosciamo essenzialmente tre livelli a comportamento omogeneo:

- I livello (0-11): le velocità delle onde S decrescono con la profondità, da 207 a 145 m/s;
- II livello (11-29): le velocità delle onde S sono sostanzialmente costanti con la profondità, intorno ai 126 m/s;
- III livello (29-50): le velocità delle onde S aumentano sostanzialmente con la profondità, da 226 ai 409.

La velocità delle onde longitudinali P (v_p) segue l'andamento delle onde trasversali sopra illustrato, sebbene in modo più articolato. I valori delle v_P variano da un minimo di 646 m/s

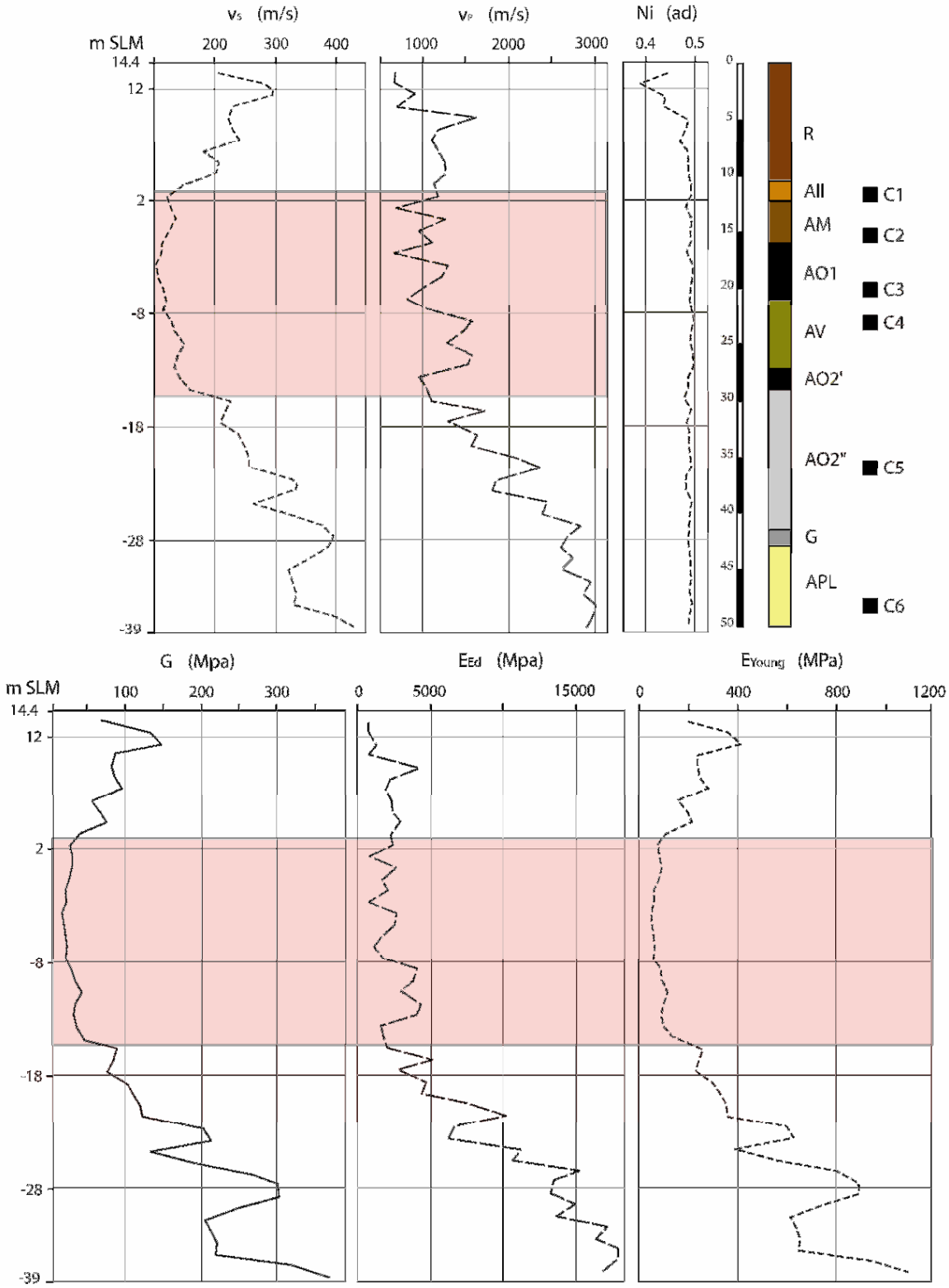


Figura 75: Profili della velocità delle onde di volume, $\mathbf{v_S}$ e $\mathbf{v_P}$, (in alto a destra) nonché del coefficiente di Poisson **v**, con la profondità; l'area in rosso mette in evidenza l'intervallo di quote (da circa 12 a 28 m dal piano campagna) un livello a bassa velocità. Il comportamento dinamico dei terreni, rappresentato dai parametri G, E_{Ed} e E_{Young}, (grafici in basso) risulta in questa fascia non lineare e costante con la profondità. A sinistra la colonna stratigrafica rappresentante gli strati attraversati in corrispondenza della prova sismica in foro e i campioni indisturbati prelevati.

alla quota di 1 metro dal piano campagna fino ad un massimo di 2,992 m/s nella parte più profonda della prova.

Correlando i dati di velocità acquisiti nella prova *cross hole* con il profilo stratigrafico, note le densità dei terreni attraversati, è possibile calcolare i parametri relativi alla rigidezza ed alla deformabilità. Rispetto a tali parametri si ripropongono i tre livelli a comportamento dinamico omogeneo, a meno del coefficiente di Poisson (Ni, ossia ν) che a partire dai 5 fino ai 50 metri assume un valore costante di 0.49. Il modulo di taglio (G) e il modulo di Young (E_{Young}) presentano lo stesso andamento determinato dalle v_S. Il modulo edometrico (E_{Ed}), necessario nel calcolo dei cedimenti ripropone l'andamento delle v_P.

Nella Figura 75 sono mostrati gli andamenti delle velocità e dei parametri calcolati rispetto alla profondità ed in Tabella 19 sono illustrati invece i corrispondenti valori medi caratteristici per ogni litotipo riconosciuto.

LITOTIPO	V_P (m/s)	V_S (m/s)	G_0 (MPa)	E_{Ed} (MPa)	E_{Young} (MPa)
R	1040	229	89	1963	260
All stor	1137	132	33	2395	98
AM	992	124	27	1822	82
AO1	995	111	21	1779	63
AV	1395	134	32	3556	97
AO2'	994	150	40	1733	119
AO2"	1832	264	131	6532	391
Apl	2863	356	256	16429	765

Tabella 19 : Valori medi caratteristici dei diversi litotipi attraversati nella prova sismica in foro di tipo *cross hole*.

Il modulo di rigidezza G, corrispondente nelle prove in sito al modulo di taglio a piccole deformazioni o $G_{max}=G_0$, assume il valore medio minimo di 21 MPa in corrispondenza delle argille organiche AO1. A partire dai 30 metri di profondità rispetto al piano campagna le velocità e i vari moduli aumentano significativamente. Il modulo edometrico presenta i valori minimi in corrispondenza dei livelli con maggiore contenuto di materia

organica AO1 e AO2", pari rispettivamente a 1,779 e 1,733 MPa. I valori massimi dei vari parametri si trovano in corrispondenza delle argille plioceniche e presentano un significativo incremento per il livello basale ghiaioso. La V_p ha un valore medio di 2,863 m/s, congruentemente ai valori attesi per il litotipo Apl, con il picco alla profondità di -33.6 m (slm) di 2,992 m/s.

Esiste tra i depositi alluvionali pliocenici consolidati e i depositi alluvionali sottoconsolidati un notevole contrasto di impedenza pari a 4.5, valore riscontrato nelle valli dei tributari del Tevere (Bozzano *et alii* 1997, Cifelli *et alii* 1999). Tale contrasto comporta una forte amplificazione delle onde sismiche, in ampiezza e durata del segnale.

PARTE TERZA

10. DISCUSSIONE

10.1 LA MODELLIZZAZIONE DELLA REALTÀ E IL SISTEMA INFORMATIVO GEOGRAFICO

La rappresentazione della realtà e quindi la sua semplificazione ed astrazione in un modello concettuale è il momento iniziale fondamentale per un approccio razionale ed organizzato nell'ambito di uno studio multidisciplinare per la valutazione di pericolosità geologica. Il lavoro metodologico intrapreso e qui illustrato (Capitolo 4) sviluppa principalmente questo aspetto e si occupa della gestione ed ottimizzazione della risorsa dei dati. La banca dati progettata è uno strumento che presenta in modo organizzato e funzionale la maggior parte dei dati che sono utili per un approccio iniziale e multidisciplinare alle principali problematiche di pericolosità geologica. Attraverso i tematismi individuati e le corrispondenti tabelle implementate nel geodatabase, è possibile avere a disposizione le informazioni quantitative e qualitative rispetto ai dati di sottosuolo (dati stratigrafici, geotecnici, idrogeologici, sulle cavità), ai dati di superficie (dati geologici, geomorfologici, topografici attuali e storici, idrogeologici, sulle cavità e voragini), ai dati sull'urbanizzato. Il grado di approfondimento e di dettaglio delle informazioni presenti nei vari tematismi è variabile ed in parte dipende dalla fonte di acquisizione (crf. tematismo CAVITIES, GEOLOGY, DATAGROUND, ecc).

La possibilità dell'implementazione di dati territoriali secondo diversi tematismi permette di avere un approccio più completo per lo studio di un settore di territorio e di visualizzare in modo sistematico più aspetti e fattori relativi alla pericolosità geologica. Nello specifico il *database* considera quattro tipologie di pericolosità geologiche legate allo sviluppo dei processi di urbanizzazione:

1. fenomeni di dissesto idrogeologico, con particolare attenzione ai terreni di riporto,
2. pericolo di crollo per presenza di cavità antropiche,
3. pericolo di subsidenza geotecnica,
4. pericolosità geotecnica sismica

Informazioni di base che sono necessari per affrontare uno studio di valutazione dei fattori della maggior parte delle pericolosità geologiche, sono (1) la ricostruzione geologico stratigrafica, ottenibile dall'integrazione della geologia di superficie (**CARG_map** in GEOLOGY) con i dati stratigrafici di sottosuolo (**St** in DATAGROUND), da cui ricavare carte

degli spessori; (2) la creazione di un modello digitale del terreno aggiornato (**contour**, **elevation_point** in DB_1999), da cui e poi possibile derivare carte delle pendenze; (3) caratterizzazione geotecnica (**Gst**, **SPT**, **mCPT**-dati da prove in sito-, **sa**, **LS**, **StL** e **SpL** – dati da prove di laboratorio- in DATAGROUND) ed informazioni idrogeologiche (**Hydro**, **pHead** in DATAGROUND, tematismo intero di HYDRO) da cui avere dati geotecnici puntuali.

Entrando nell'ambito delle specifiche pericolosità è possibile, inoltre, ottenere e considerare, per:

1. Dissesto idrogeologico connesso ai terreni di riporto:
   - Informazioni sull'ubicazione dei dissesti di versante attivi, passivi o quiescenti censiti sul territorio (tematismo dedicato GEOMORPFOLOGY);
   - Informazioni quantitative sulla trasformazione del territorio negli ultimi secoli, operando sui DEMs storici e quello attuale ed ottenendo mappe degli spessori dei terreni sottratti od aggiunti (tematismi Db_1907, DB_1934, DB_1999);
2. Pericolo crollo per cavità antropiche:
   - Informazioni su quote di tetto e letto di cavità incontrate durante i sondaggi e in quale litologia e formazione (dati in **St**, DATAGROUND);
   - Informazioni sull'apertura di voragini (**XYhole** in CAVITIES), pertinenti ad un *database* specifico della Protezione Civile, *Sinkhole* (Corazza 2004)
   - Informazioni puntuali sull'ubicazione di cavità in sotterraneo censite nel lavoro di Sciotti del 1998;
3. Pericolo di subsidenza geotecnica:
   - Informazione sull'ubicazione ed altezza degli edifici attuali per valutare indicativamente i carichi applicati sui terreni di fondazione (MainBuildings in CBuildings)

In particolare per la valutazione della pericolosità sismica (4), il modello concettuale prende in considerazione i dati utili per un lavoro di microzonazione, che per i livello 1 e 2 non necessita dell'uso di software esterni a quelli propri dei sistemi informativi geografici. Per la microzonazione di livello 3, la banca dati è in grado di permettere la ricostruzione delle geometrie bedrock, degli spessori, delle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche dinamiche dei depositi superficiali di terreno. Per definire il modello del sottosuolo in termini di proprietà sismiche dei terreni il *geodatabase* permette

di accedere alla tabella **Bh** per avere i sondaggi disponibili sull'area da caratterizzare che permette di accedere a:

- Tabella **St** per avere la ricostruzione stratigrafica;
- Tabella **Vps** per avere il tipo di prove sismiche in foro e quindi a **V** per i profili di velocità delle onde S, P e dei parametri di deformabilità;
- Tabella **sa** per avere i campioni disponibili e quindi a **SpL** per la tipologia di prove di laboratorio di tipo sismico/ciclico effettuate e poi a **pLink** per visualizzare i grafici relativi.

Attraverso le tabelle **Vps** e **V** si ottengono i profili di velocità dei terreni rispetto alle onde P e S, correlabili attraverso le profondità alle informazioni stratigrafiche contenute in **St**. Si calcolano quindi i valori del modulo di taglio (G) e dei parametri di deformabilità (E_{Young}, E_{Ed}, ν), individuando un valore medio caratteristico per ogni unità stratigrafica-geotecnica individuata. Tali informazioni sono integrate dai dati di laboratorio presenti nella tabella **SpL**. In questa tabella è possibile conoscere che tipo di prove sono disponibili per un dato campione appartenente ad un certo sondaggio e tramite la tabella **pLink** si accede direttamente ai grafici che mostrano gli andamenti delle curve $G(\gamma)$ e $D(\gamma)$, rispettivamente rigidezza e smorzamento dei terreni all'aumentare della deformazione tangenziale, normalizzato rispetto al valore iniziali G_0 e D_0. Le informazioni sulle proprietà dinamiche dei terreni si collegano ai dati stratigrafici attraverso le quote di prelievo dei campioni su cui sono state effettuate le specifiche prove, individuate nella tabella **sa**.

La definizione di una sezione tipo dove si individua il modello geologico-stratigrafico e il modello costitutivo del terreno è uno degli *input* dell'analisi numerica per la determinazione del moto sismico di una porzione di territorio rispetto ad un terremoto di riferimento.

I dati necessari all'analisi delle diverse pericolosità geologiche sono estraibili di volta in volta attraverso interrogazioni spaziali o tematiche per specifici attributi (in base ai campi definiti nelle tabelle). Per quanto riguarda i dati del sottosuolo essi sono interconnessi e facilmente accessibili in quanto collegati attraverso una chiave secondaria all'ubicazione del sondaggio a cui si riferiscono.

Un aspetto rilevante della banca dati consiste nell'indipendenza dei dati dalla particolare pericolosità investigata. Infatti la logica della strutturazione del *geodatabase* è stata quella, in particolare per la stratigrafia di considerare le informazioni all'origine e contestualmente fornire un'interpretazione, mentre per i dati provenienti da prove geotecniche si sono

forniti i certificati originali. In questo modo il dato originario è preservato e sempre scisso a livello concettuale dall'interpretazione specifica. Tale aspetto fa si che sia discriminante nell'analisi dei dati il ruolo dell'elaboratore. La sua esperienza può fornire un valore aggiunto alle informazioni di base ed il dato può essere sempre controllato e verificato.

10.1.1 Il progetto sviluppato e le istituzioni

La Banca Dati Territoriale sviluppata in ambiente G.I.S. presentata in questa tesi si inserisce nell'ambito delle attività di pianificazione del territorio e laddove sia necessaria una conoscenza completa secondo più aspetti disciplinari dell'ambiente naturale da considerare. Il *geodatabase* proposto permette un approccio speditivo alla conoscenza delle problematiche e dei dati disponibili in modo puntuale sul territorio e consente di indirizzare al meglio la fase successiva di approfondimento e di studio. Come nel caso della pericolosità sismica illustrato attraverso lo studio delle aree di Porta Metronia (Capitolo 9.1) e di Giustiniano Imperatore (Capitolo 9.2), la banca dati permette di estrarre le informazioni necessarie ai successivi studi di microzonazione, avendo determinato il modello geologico-geotecnico dell'area, in termini di parametri geomeccanici in condizioni statistiche e dinamiche, di spessori e variabilità litologica dei terreni.
La banca dati può quindi inserirsi nel contesto di Protezione Civile, nella fase iniziale di analisi del territorio e di individuazione dei dati utili a disposizione; può altresì essere utilizzata dalle unità operative del Comune per la verifica iniziale di idoneità dell'ubicazione di progetti ed in generale nella pianificazione territoriale. Essa si rivolge principalmente agli organi istituzionali con competenza a livello comunale e che sono operative sul territorio nell'ambito dell'ottimizzazione delle risorse e dell'integrazione delle conoscenze. Inoltre è competenza del Comune la raccolta dei dati provenienti da indagini del sottosuolo.
Le attività relative al ciclo di vita della banca dati si possono suddividere in (1) una fase di manutenzione ed aggiornamento dei dati, (2) una fase di gestione, interrogazione, interpretazione ed infine (3) una terza fase di supporto alle decisioni tramite produzione cartografica tematica. Le diverse fasi, ed in particolare le ultime due, prevedono l'impiego di risorse professionalmente preparate in campo geologico-geotecnico. La banca dati, occupandosi di dati multidisciplinari, può fornire le basi per un confronto ampio sulle componenti territoriali e favorire la comprensione delle relazione esistenti tra i diversi

fattori ambientali. In questo senso essa può essere intesa come risorsa precipua per l'analisi integrata non solo di problematiche relative alla pericolosità geologica, ma anche la base di partenza per la valutazioni iniziali di impatto di opere rilevanti sul territorio.

Nell'ambito della gestione del territorio e della valutazione delle pericolosità geologiche, la banca dati quindi si inserisce nelle fasi iniziali di approccio al territorio, nel momento in cui si devono considerare i possibili fattori di pericolosità incidenti in un'area o si deve contestualizzare un intervento, un'opera civile. In questo ultimo caso può fornire indicazioni generali su ubicazione di edifici e scelta di percorsi di viabilità. Inoltre nell'ambito di studi di microzonazione può fornire un contributo specifico, definendo il modello costitutivo del sottosuolo in termini di proprietà dinamiche e le geometrie delle unità litostratigrafiche riconosciute.

10.2 LA RISPOSTA DINAMICA DEI TERRENI ALLUVIONALI IN RIVA SINISTRA

La determinazione della risposta dinamica ed in particolare del comportamento non lineare e dissipativo dei terreni richiede un insieme di indagini, in sito e in laboratorio, tali che la valutazione complementare dei loro risultati fornisca un quadro completo delle proprietà dinamiche a diversi livelli di deformazione. Nella definizione di tali proprietà per i depositi alluvionali del Fosso delle Acque Mariane e del Fosso di Grotta Perfetta le prove sismiche in foro di tipo *cross hole* hanno permesso di caratterizzare il comportamento in sito a piccole deformazioni ($\gamma<10^{-3}$).

Generalmente i valori di velocità tendono a crescere con la profondità, ma l'eterogeneità del sottosuolo in termini stratigrafici e fisico-meccanici, determina un profilo di velocità molto articolato, dove l'aumento dei valori registrati viene spesso disatteso. I terreni attraversati durante le prove *cross hole* illustrate in questa Tesi sono relativi ai processi di sedimentazione in ambiente fluviale e marino, e si presentano prevalentemente incoerenti, di consistenza e granulometria variabile. In Tabella 20 sono rappresentati i valori di densità e velocità delle onde S, attesi per alcuni materiali che si trovano frequentemente nei primi 50-60 metri dal p.c. nell'area romana di nostro interesse.

Materiali	ρ (t/m^3)	V_S (m/s)
terreni organici, torbe argille molto molli	1.0 - 1.3 1.4 - 1.7	< 100
terreni piroclastici sciolti argille tenere, sabbie sciolte	1.0 - 1.7 1.6 - 1.9	100 - 200
terreni piroclastici densi/cementati argille consistenti, sabbie dense	1.2 - 1.9 1.8 - 2.1	200 - 400
roccia tenera	1.5 - 2.2	400 - 800
roccia lapidea	2.5 - 3.0	> 800

Tabella 20: Valori indicativi di densità (ρ) e velocità delle onde S (v_s) per alcuni terreni naturali sedimentari e piroclastici (Lanzo & Silvestri 1999).

Nella valle del Fosso delle Acque Mariane, delle 6 prove *cross hole* acquisite, la SN14, arriva a toccare il basamento pliocenico, posto alla quota di circa -4 m slm e a 36.3 m (p.c.) dal piano campagna. La presenza di una zona a bassa velocità tra 0 e 28 metri dal piano campagna con v_s inferiori ai 300 m/s, mostra un volume di terreno in cui la velocità delle onde di taglio è praticamente costante con la profondità. Le velocità sono piuttosto basse, intorno ai 100 m/s per i primi 8 metri dal piano campagna per poi avere un brusco

aumento e stabilizzarsi più o meno intorno ai 250 m/s fino a 28 m dal p.c.. Dal punto di vista stratigrafico nei primi 28 m dal p.c. si riconoscono 16.6 m di terreni di riporto e 12.4 m di depositi limosi ed argillosi con materia organica diffusa, appartenenti ai depositi alluvionali olocenici del fosso (ba).

Da notare che i valori minimi delle velocità delle onde di volume si registrano nei primi 8 metri dal piano campagna, corrispondenti alla parte superficiale dei depositi antropici con v_s e v_p costanti con la profondità e rispettivamente pari a 114 e 273 m/s.

Il litotipo APL, corrispondente alle argille plioceniche della formazione del Vaticano, è campionato per 5.70 metri, verosimilmente nella sua parte sommitale dove è in transizione sulle ghiaie sabbioso-limose e non presenta la sua facies argillosa sovraconsolidata tipica. I relativi valori di v_s e v_P sono leggermente inferiori a quelli che di solito caratterizzano tale litotipo nell'area romana, con rispettivamente valori medi di 482 m/s, 1,911 m/s e massimi di 526 m/s, 2,090 m/s.

La presenza della falda principale intorno ai 16-18 m dal piano campagna non determina delle variazioni significative nei valori delle velocità di propagazione delle onde e di conseguenza neanche sui parametri derivati.

Commentando i risultati in termini di parametri elastici e di rigidezza E_{Young}, Ni, G ed E_{Ed}, si riconoscono tre zone approssimativamente a comportamento omogeneo:

1. zona superficiale: dal piano campagna a circa 8 metri di profondità, i parametri di deformabilità presentano i valori minimi e sono piuttosto variabili, riflettendo la variabilità dello stato fisico in termini granulometrica e di consistenza dei terreni antropici;
2. zona intermedia: da 8 m a 28 m di profondità (p.c.), i moduli elastici dinamici assumono valori sostanzialmente costanti con la profondità e caratterizzano i depositi alluvionali recenti relativi alla sedimentazione del fosso, a tratti stagnante;
3. zona profonda: oltre i 28 m (max 42 m), i parametri presentano i valori maggiori con un salto netto rispetto alla zona precedente; dal punto di vista litologico essa coincide con i depositi argilloso-ghiaiosi del ciclo sedimentario pleistocenico (verosimilmente Santa Cecilia, vedi Paragrafo precedente) e con la parte sommitale delle argille plioceniche.

In particolare per quanto riguarda il profilo di profondità relativo al coefficiente di Poisson (Ni, ν), esso assume valori piuttosto variabili laddove è presente il terreno di riporto, dove si alternano depositi granulari incoerenti a parti di roccia tufacea, probabile resti di muratura.

Dal punto di vista dinamico si può quindi concludere che il profilo di velocità ottenuto tramite le prove cross hole, individua le principali variazioni litologiche, geotecniche e di struttura delle formazioni riconosciute in sondaggio. I terreni attraversati fino a 42 m sono non elastici, presentando valori del modulo di Young di molto inferiori ai 40,000 MPa e per il corpo alluvionale presenta dei valori di rigidezza superiori alla coltre dei riporti. Tale situazione può essere spiegata attraverso un approfondimento sulla storia tensionale propria dei diversi depositi e ricordando che il processo di urbanizzazione, e di conseguenza la messa in posto dei terreni di riporto in questa area è avvenuto in almeno due differenti momenti, uno più antico ed uno recente. Inoltre il bedrock sismico sembra essere rappresentato in parte anche dai depositi sedimentari pleistocenici, presentando valori di rigidezza simili alle argille plioceniche, probabilmente non sufficientemente campionate per ottenere il valore rappresentativo del deposito.

Il Fosso di Grotta Perfetta è stato indagato dal punto di vista dinamico, attraverso una prova *cross hole*, realizzata *ad hoc* per la caratterizzazione in termini di rigidezza e deformabilità dei terreni dell'intera sequenza alluvionale olocenica fino alle argille del bedrock sismico appartenenti alla formazione di Monte Vaticano.

Nel profilo di velocità, le onde v_s individuano una zona a bassa velocità compresa tra le quote assolute di 3/4 m fino a -15/-16 m slm. Tale fascia di terreno è costituita dai depositi limoso-argillosi molto ricchi di materia organica che intorno ai 30m p.c. evolvono in sedimenti con uno scheletro pozzolanaceo dominante e minor contenuto in sostanza torbosa. I terreni a bassa velocità mostrano dei valori medi di v_s intorno ai 126 m/s. I valori minimi si registrano in corrispondenza dei livelli AO1 e AV, già evidenziati dalla geotecnica in condizione statiche come livelli a resistenza minima e sottoconsolidati, correlabile all'elevata percentuale di materia organica presente in forma colloidale.

I parametri derivati di deformabilità, in particolare il modulo di rigidezza massima G, assume dei valori inferiori ai 30 MPa. Per terreni con valori così bassi in termini di velocità, risulta imprescindibile la determinazione della curva $G(\gamma)/G_0$ per conoscere il comportamento del terreno a diversi livelli di deformazione e dopo ripetuti cicli di applicazione. Il comportamento previsto per terreni argillosi con velocità delle onde di taglio inferiori ai 200 m/s, in particolare per i litotipi AV, AO1, AO2', è infatti fortemente non lineare, facendo presupporre una forte propensione all'amplificazione, ma implicando un considerevole smorzamento (Fig. 76) tanto maggiore quanto più alto è l'indice di plasticità del terreno.

Dal punto di vista della deformabilità e della rigidezza del terreno è possibile riconoscere quattro zone a comportamento omogeneo:

1. zona superficiale: dal p.c. a circa 11 m, zona corrispondente alla coltre dei terreni di riporto la cui rigidezza decresce con la profondità, evidenziando la minore consistenza dei terreni granulari basali;
2. zona intermedia: da 11 a 29 m, i terreni sono quelli alluvionali olocenici ricchi in sostanza organica con valori di rigidezza minimi ed un andamento prevalentemente costante con la profondità;
3. zona intermedia-profonda: da 29 m a 42 m circa, costituita dai depositi alluvionali con scheletro pozzolanaceo che comporta un incremento graduale della velocità con la profondità e perciò una aumento della rigidezza;
4. zona profonda: da 42 m fino a 50 m, zona in cui si ha un brusco aumento della vs che incrementa via via con la profondità, corrispondente al bedrock sismico delle argille plioceniche.

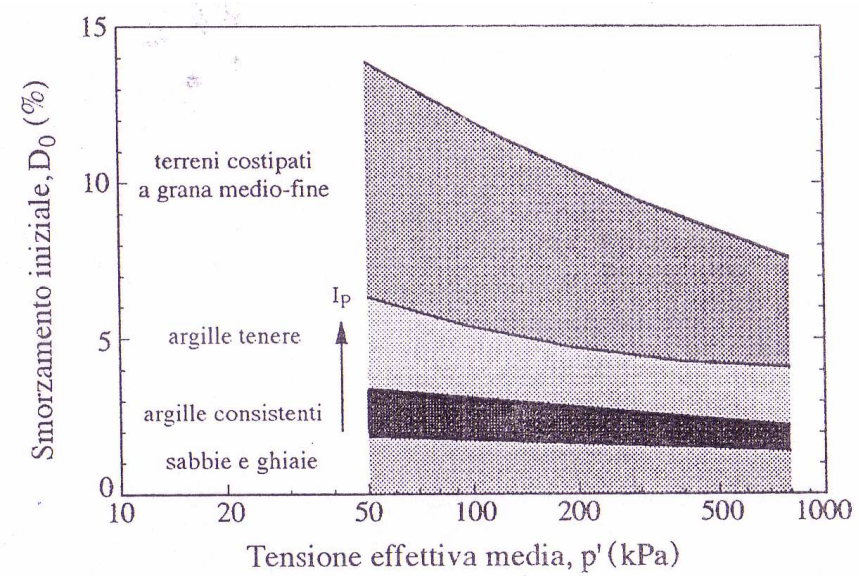


Figura 76: Dipendenza del fattore di smorzamento iniziale D_0 dal tipo di terreno e dalla tensione effettiva (da Vinale *et alii* 1996).

Una riflessione a parte merita il profilo del modulo edometrico in sito che rappresenta la rigidezza alla compressione ad espansione laterale impedita. Rispetto ai valori ottenuti dalle prove di laboratorio edometriche, i risultati calcolati dalla onde di compressione P mostrano valori molto più elevati, di circa 3 ordini di grandezza. Tale sensibile differenza è giustificata dal fatto che nella prova in sito si opera nel campo delle piccole deformazioni e la pressione di confinamento reale è di molto maggiore a quella applicata al campione di

laboratorio e il terreno non è un mezzo elastico ideale (vedi APPENDICE II). Comparare quindi i risultati delle due prove non è possibile in virtù delle deformazioni prodotte e della natura delle prove stesse, differenti dal punto di vista metodologico-concettuale.Il modulo edometrico comunemente utilizzato è quello che deriva da prove edometriche di laboratorio, dove il campione subisce una notevole deformazione. In letteratura non si segnalano lavori di correlazione tra i risultati derivati dalle due tipologie di prove. Nel contesto di questa Tesi il calcolo del modulo edometrico da prove sismiche è piuttosto un esercizio sulle possibilità di estrapolazione e di calcolo di nuovi dati a partire dalle informazioni inserite nel *geodatabase*.

10.3 I DUE FOSSI A CONFRONTO: CONSIDERAZIONI GEOLOGICHE, GEOTECNICHE E LA PERICOLOSITÀ INCIDENTE SUL TERRITORIO STUDIATO

Il Fosso delle Acque Mariane ed il Fosso di Grotta Perfetta rappresentano due casi esemplificativi dei tributari in riva sinistra del fiume Tevere, nonché delle peculiari condizioni urbanistiche della città di Roma. Entrambi, ormai obliterati dal tessuto urbano, sono esempi dell'interazione tra l'uomo e l'ambiente e delle problematiche connesse.

Il fosso delle Acque Mariane (A.M.)si trova in prossimità del Centro Storico della città in un'area di urbanizzazione storica, culminata negli anni '30 con la costruzione del quartiere Appio Latino. Era un rivo che scendeva dai Castelli Romani e percorreva quasi in linea retta la distanza tra Grottaferrata e Porta S. Giovanni, dove deviava per la Valle delle Camene (attuale via delle Terme di Caracalla) fino ad attraversare il Circo Massimo prima di gettarsi nel Tevere.

Il Fosso di Grotta Perfetta (G.P.) si trova invece in un'area di recente espansione che ha avuto il suo acme negli anni '50/'60, caratterizzata da una edilizia di tipo intensivo. Era un vero e proprio affluente del Fiume Tevere, parte terminale del Fosso di Tor Carbone con un bacino idrografico di 13.6 km^2 (Ventriglia 2002).

La differente importanza idrologica dei due corsi d'acqua, il Fosso delle Acque Mariane, legato alla canalizzazione delle acque volute da Callisto II, il Fosso di Grotta Perfetta di maggiore portata e bacino idrografico, si evidenzia nella diversa natura e spessore dei depositi riconosciuti in sondaggio. Il Fosso delle Acque Mariane non arriva ad incidere le argille di Monte Vaticano ma erode da NE approfondendosi verso SO il substrato pleistocenico. Lo spessore massimo dei depositi nella valle A.M. è pari a circa 17 metri, mentre ha uno spessori medi di oltre 30 metri (max 45-50 m) nel fosso di G.P., il quale incide profondamente le argille plioceniche. Rispetto all'area di G. P., il tetto del Pliocene si trova a quote ben superiori intorno ai -4 m slm, contro i -30 slm (max -35m) di via Giustiniano Imperatore. L'area di Porta Metronia coincide infatti con un alto strutturale riconosciuto dalla gravimetria con un massimo gravimetrico ad andamento NNO-SSE, mentre la zona di San Paolo rappresenta un basso gravimetrico (Cesi *et alii* 2008, Fig. 77).

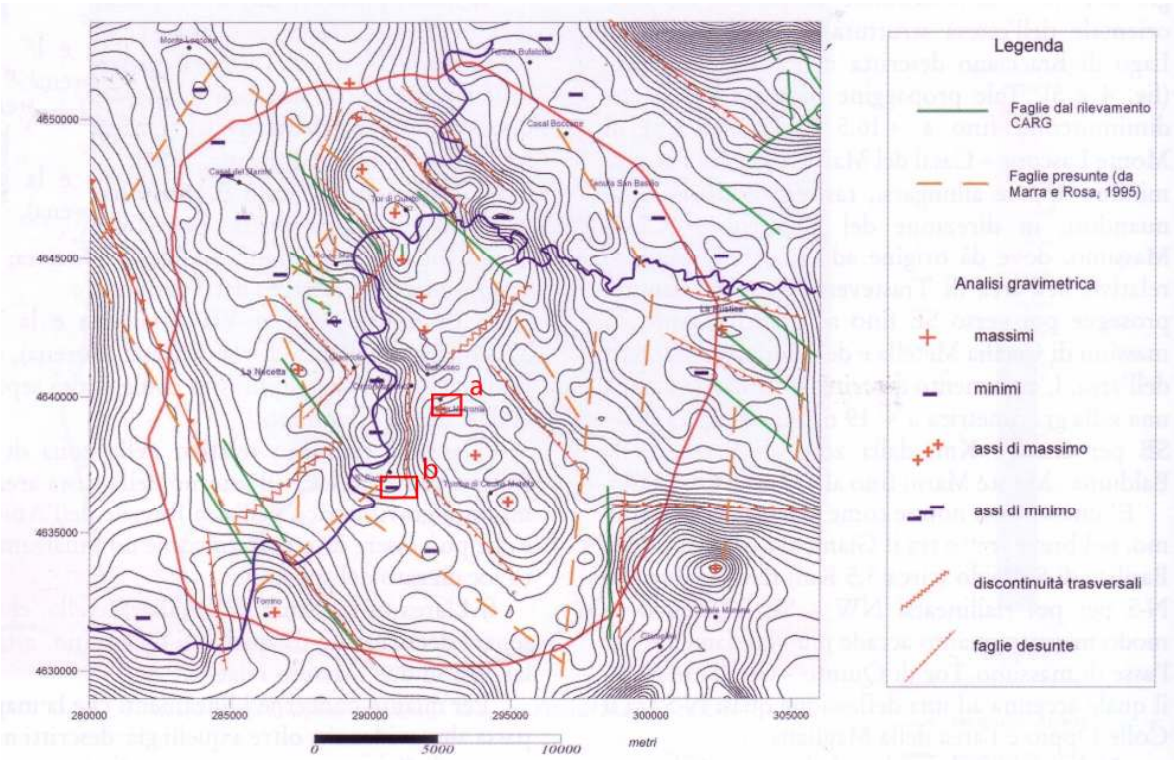


Figura 78: Elementi tettonici su mappa gravimetrica High Pass (filtrata con lunghezza d'onda di 11 km) (da Cesi *et alii* 2008)

I depositi alluvionali riconosciuti in sondaggio nelle valli studiate hanno presentato un comportamento geotecnico sensibilmente differente. Nel Fosso delle Acque Mariane i depositi sono costituiti da una alternanza di argille limose e livelli sabbiosi con un contenuto di materia organica assai variabile, al di sopra dei quali vi è una coltre di terreni di riporto di 15 metri di spessore medio. Il corpo alluvionale del Fosso di Grotta Perfetta risulta molto più spesso (circa 2.5/3 volte) e in esso si individua una serie stratigrafica ben precisa, articolata in unità lito-tecniche. Il dato stratigrafico e geotecnico principale che ne deriva è la presenza in G.P. di un più elevato contenuto in materia organica e uno stato di sottoconsolidazione non riscontrato per l'area A.M.. Tali condizioni sostanzialmente differenti evidenziano da una parte un ambiente a diversa energia e dall'altra una diversa storia tensionale. Il fosso A.M. probabilmente di portata inferiore, ma maggiore energia, non ha permesso il crearsi di un ambiente riducente adeguato all'accumulo di notevole materia organica, sebbene non ne risulti privo. Inoltre la messa in posto di terreni antropici è avvenuta fin dall'epoca degli antichi Romani, iniziata con l'edificazione delle Mura Aureliane, e completata all'inizio del secolo scorso con l'urbanizzazione del quartiere Appio-Latino, ha consolidato i depositi alluvionali del fosso. Nel fosso G.P. si riconosce invece un ambiente iniziale di alta energia, che ha permesso al fosso di incidere il substrato

vulcanico fino alle argille vaticane, per poi intervenire un importante periodo a bassa energia testimoniato dal sedimento argilloso dominante e in soluzione colloidale con la sostanza organica (Campolunghi *et alii* 2008).

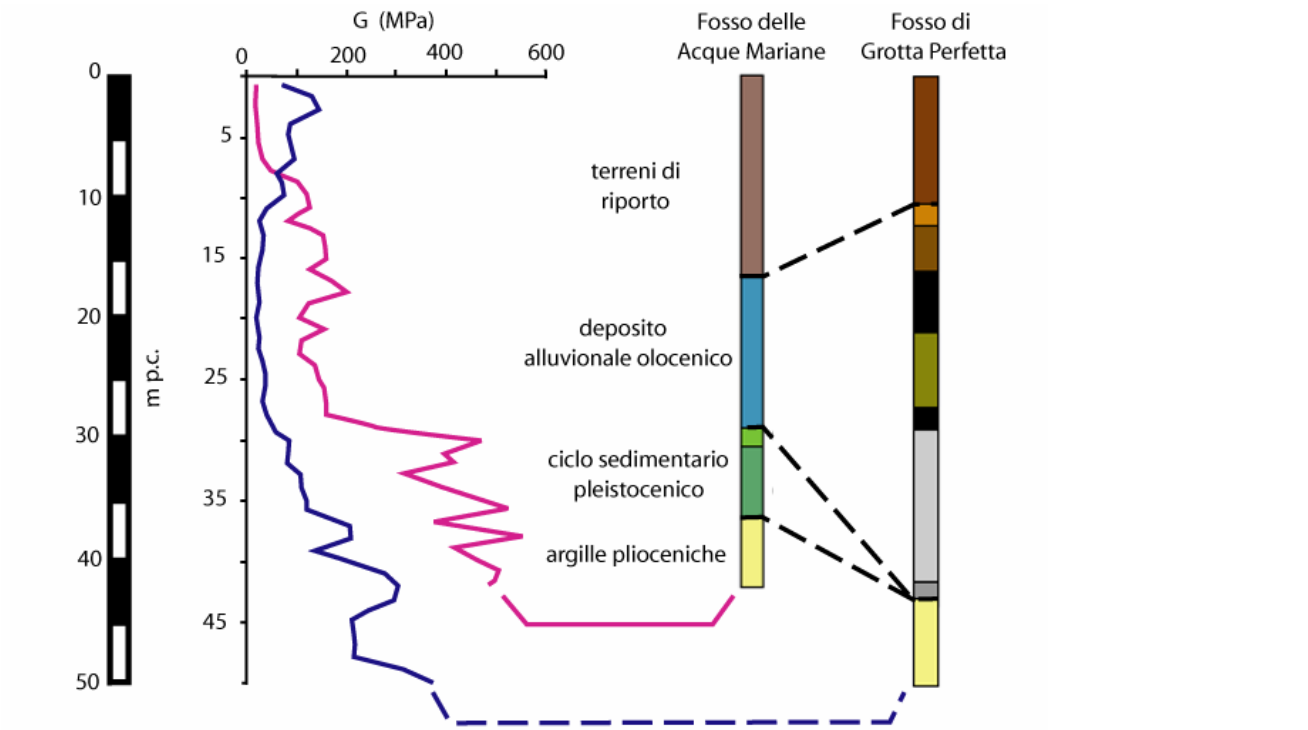


Figura 78: Profilo della variazione del modulo di taglio G, calcolato a partire dalle velocità delle onde S ottenute durante le prove sismiche in foro *cross hole*, con la profondità. Sulla destra i profili stratigrafici relativi ai due tributari del Tevere in sinistra idrografica studiati.

In Figura 78 sono messi a confronto i risultati in termini di rigidezza G, dei depositi del Fosso delle Acque Mariane e del Fosso di Grotta Perfetta. Il primo dato che si evidenzia è l'attestarsi dei valori del modulo di taglio della serie del Fosso di Grotta Perfetta, su valori sistematicamente minori di circa 100 MPa rispetto al Fosso delle Acque Mariane per depositi riconducibili alla stessa formazione geologica, a meno dei primi 7-8 m p.c in cui l'andamento è invertito. Tale situazione conferma in generale i dati geotecnici in condizioni statiche, riconfermando un quadro di pericolosità geotecnica in senso lato, molto più accentuata ed importante per l'area di Giustiniano Imperatore. L'inversione di tendenza individuata nei primi 8 metri p.c. è relativa alla coltre dei terreni di riporto, dove i depositi relativi alla parte superficiale dei riporti di A.M. presenta una rigidezza sensibilmente inferiore a quella dei riporti di G.P.. Questo dato ripropone la messa in posto della coltre dei riporti nel fosso A.M. in almeno due diversi momenti storici. Gli elementi acquisiti nel corso di questa Tesi non permettono di definirli con esattezza, non avendo

informazioni di dettaglio su tale materiale dal punto di vista litostratigrafico o cronologico, ma è plausibile ipotizzare un primo momento di messa in posto in epoca romana, connessa alla realizzazione delle Mura Aureliane e alle varie costruzioni della Basilica di S. Giovanni, ed un secondo momento pertinente all'urbanizzazione dei primi trent'anni del secolo scorso ed alle relative opere. Considerando la formazione dei terreni di riporto si possono individuare alcune differenze, prima fra tutte la diversa origine dei frammenti antropici riconosciuti, appartenenti a differenti epoche storiche e soprattutto il discrimine della presenza della plastica per i depositi di G:P. La coltre dei terreni di riporto sembra coprire in modo continuo entrambe le aree con spessori medi di 15 metri nell'area di A.M. e inferiori ai 10 metri nell'area di G.P.

Le principali pericolosità geologiche che insistono sulle valli alluvionali fortemente antropizzate, riguardano le caratteristiche geologico-geotecniche dei depositi alluvionali interessati dal processo di urbanizzazione ed il contesto idrogeologico che ne viene quindi modificato. In particolare le principali pericolosità geologiche incidenti sulle aree studiate, sono quella legata alla possibilità di fenomeni di amplificazione sismica di entità tale da produrre lesioni ad edifici e manufatti e quella legata a fenomeni di subsidenza per consolidazione dei terreni. Le pericolosità geologiche evidenziate incidono sul territorio in modo da non produrre un rischio diretto di grado elevato per la popolazione, ma indirettamente, con il peggioramento e delle condizioni di stabilità e di sicurezza degli edifici, determinano un rischio per l'incolumità delle persone ed un costo economico non trascurabile per la società. In questo contesto è evidente la funzionalità della banca dati progettata in questa Tesi che permette di raccogliere le informazioni essenziali per avere una prima lettura del territorio in termini di informazioni tematiche disponibili.
Nelle aree studiate si riconoscono diffusi danneggiamenti, a volte fino al crollo di parti degli edifici (per esempio il crollo del tetto della Basilica di San Giovanni nel 1349, dal Catalogo dei Terremoti, Molin *et alii* 1995), collegati ad eventi sismici. Per l'area di Porta Metronia, attraverso notizie, documenti e scritti storici si ha una registrazione degli effetti macrosismici su manufatti archeologici e/o storici come le Mura Aureliane e la Basilica di San Giovanni in Laterano (Figura 79), attribuiti a sismi di diverse aree sismogenetiche. Per l'area di via Giustiniano Imperatore, ossia la valle di Grotta Perfetta, sono assenti dati in epoca storica, ma l'indagine macrosismica condotta subito dopo i terremoti appenninici relativi alla serie umbro marchigiana del biennio 1997-98, da Cifelli *et alii* 1999, riporta una serie di risentimenti avvertiti dalla popolazione (Fig. 80, parte destra).

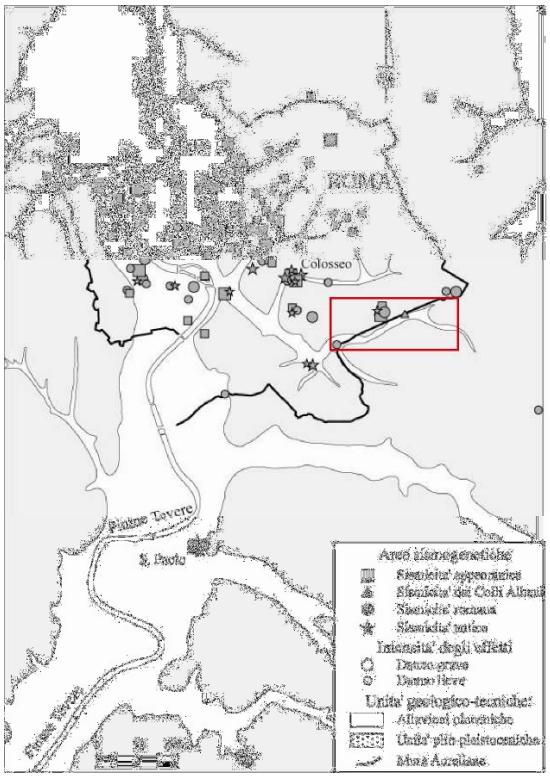


Figura 79: Distribuzione degli effetti sismici dei principali terremoti storici su 151 monumenti di Roma, in funzione dell'intensità, dell'area sismogenetica di provenienza e dei caratteri geologico-tecnici delle unità affioranti (da Donati *et alii* 1999). L'area di Porta Metronia, corrispondente in parte all'estensione dei depositi del Fosso delle Acque Mariane, è perimetrata in rosso.

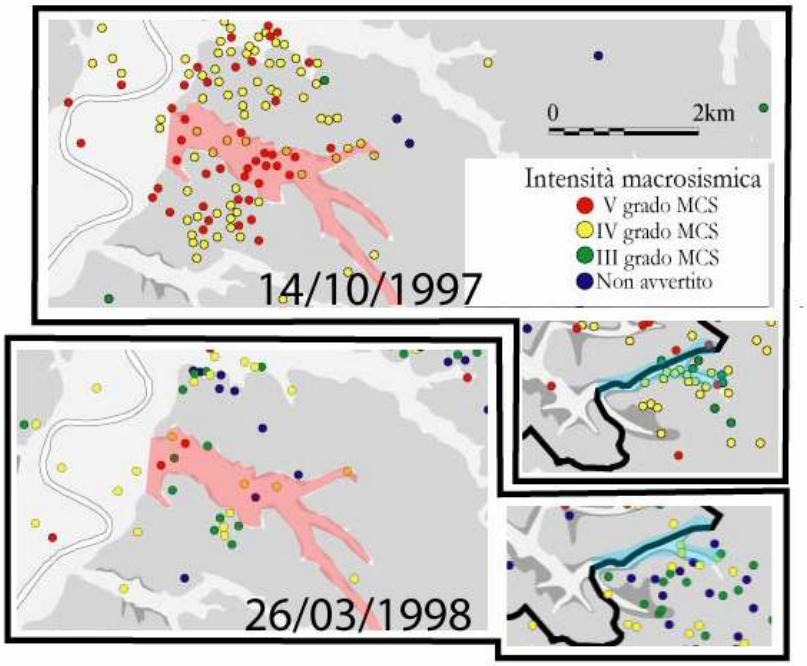


Figura 80: Risentimenti macrosismici avvertiti nelle aree corrispondenti al Fosso di Grotta Perfetta (a destra) e del Fosso delle Acque Mariane (a sinistra) durante le due scosse principali dello sciame sismico dell'Umbria-Marche 1997-98 (Cifelli *et alii* 1999 modificato). Il terremoto del 14 Ottobre 1997 fu caratterizzato da una magnitudo (Mw) di 5.6, un'intensità della scala Mercalli-Cancani-Sieberg (I_0 MCS) pari a VIII grado, con un ipocentro (h) di 10 km; mentre il terremoto del 26 Marzo 1998 presentò le seguenti caratteristiche: Mw=5.3, I_0=VI-VII MCS, h=50 km.

Gli studi presentati in questa Tesi, in particolare dal punto di vista del comportamento dei terreni in caso di sollecitazioni sismiche, attraverso dati derivati da prove sismiche in foro di tipo cross hole, non sono sufficienti a fornire una zonazione sismica del territorio di tipo quantitativo. Per conseguire una microzonazione del territorio è necessario acquisire dati in termini di proprietà smorzanti dei terreni e individuare il sismogramma del terremoto di riferimento su cui calcolare il fattore di amplificazione locale. Infatti il comportamento fortemente non lineare riscontrato per i depositi attraversati nei due fossi, predice una forte propensione all'amplificazione sismica contestualmente ad un importante comportamento smorzante. La mancanza di ulteriori dati mirati non permette la quantificazione dei due diversi comportamenti e di come essi si sommino durante un eventuale sisma atteso. La banca dati però fornisce la possibilità di integrare i dati sulle proprietà di dinamiche dei terreni, derivate da prove di laboratorio specifiche ed estrarre tutte le informazioni utili che, insieme al sisma di riferimento, si introducono nei moduli di calcolo specifici per ottenere il moto sismico locale. Nel caso di Porta Metronia, nella valle del Fosso delle Acque Mariane, si è messo a confronto lo spessore dei depositi suscettibili di amplificazione sismica, depositi alluvionali e terreni di riporto, con i danneggiamenti storici riscontrati. Rispetto allo spessore dei terreni alluvionali (Figura 81) i danni risentiti dalle Mura Aureliane si trovano in coincidenza dei massimi spessori o lungo bordi della valle, congruentemente con quanto ipotizzato da studi su terremoti storici (Tertulliani & Riguzzi 1995) e da modellizzazione numeriche (Rovelli *et alii* 1995).

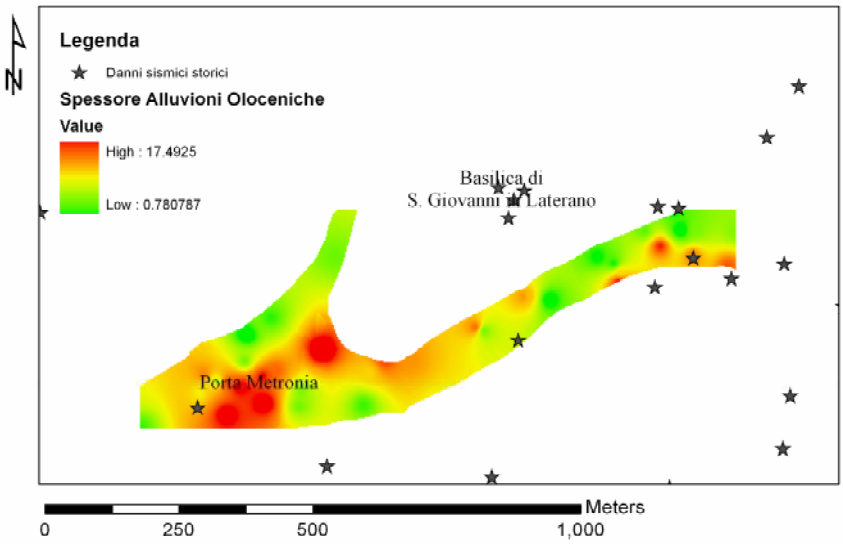


Figura 81: Mappa degli spessori dei depositi alluvionali olocenici (ba, litofacies LSO) della valle del Fosso delle Acque Mariane e ubicazione dei danni risentiti dai monumenti presenti nell'area, in seguito ai terremoti storici (ottenuti mediante georeferenziazione della mappa di Donati *et alii* 1999, Figura 82). I danni lungo la valle sono stati subiti dalle Mura Aureliane durante il terremoto del 1703, 1899 e 1915.

Per quanto riguarda i danneggiamenti subiti dalla Basilica di San Giovanni in Laterano, essi sono stati correlati con lo spessore dei terreni di riporto, particolarmente potenti in questa area (Fig. 82). La qualità assai bassa dei depositi di riporto almeno nei primi 8 metri di spessore, ma anche le debolezze strutturali dell'edificio monumentale della Basilica possono essere stata la causa delle lesioni ripetute al manufatto.

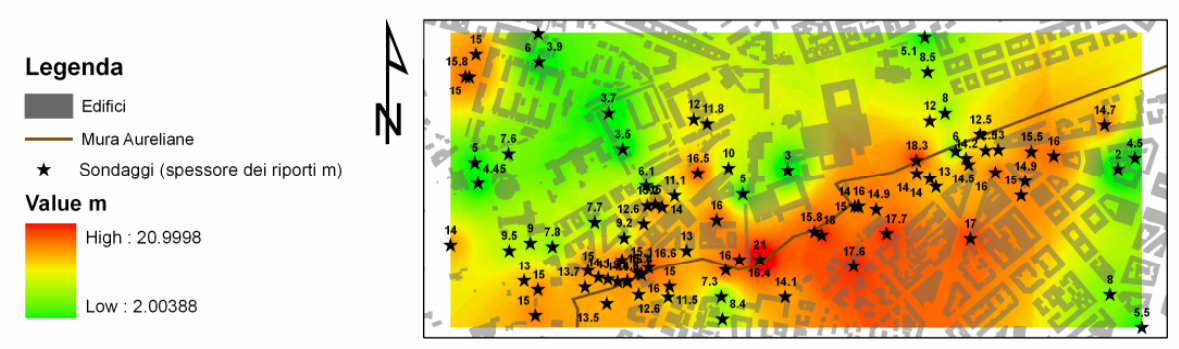


Figura 82: Mappa degli spessori dei terreni di riporto (R, litofacies TA) dell'area di Porta Metronia. I danni nell'area della collina vulcanica del Celio si riscontrano principalmente nella Basilica di San Giovanni in Laterano con lesioni importanti durante i terremoti del 1349, 1812, 1899 e 1915.

Un ulteriore problematica che insiste sulle aree alluvionali recenti, come accennato precedentemente, è la pericolosità connessa al naturale processo di consolidazione dei terreni argillosi. Nell'area romana tale pericolosità è connessa ai depositi argillosi legati alla presenza del Tevere e dei suoi tributari. L'urbanizzazione delle aree vallive occupate da tali depositi ha implicato la messa imposta di spessori considerevoli di terreni di riporto e la costruzione di edifici a scopo residenziale di tipo intensivo. In queste aree il carico indotto sui depositi ha prodotto dei processi di subsidenza accentuati dell'ordine di diversi millimetri, responsabili del dissesto di molti fabbricati, come nel caso di via Giustiniano Imperatore, valle del Fosso di Grotta Perfetta. Tramite l'interferometria InSar è possibile ottenere la restituzione del territorio in termini puntuali di spostamenti verticali (Fig. 83) L'immagine a disposizione nell'area romana per l'intervallo 1991-2000 e riconfermato dal recente telerilevamento 1992-2005 (Desiderati 2005, Campolunghi *et alii* 2008) mostra per il reticolo fluviale tiberino nell'area romana una situazione di movimenti verticali piuttosto differenziata. Lungo le alluvioni strettamente tiberine si ricosse un'area stabile corrispondente al centro storico, in cui il carico millenario degli edifici ha completamente esaurito i cedimenti dei terreni. Le restanti aree, sia a Nord sia a Sud del centro storico sono invece in forte subsidenza con valori che oscillano dai -3 ai -6 millimetri all'anno. Per quanto riguarda le aree occupate dai tributari del Tevere, la situazione si presenta in modo differente se ci si trova in sinistra o in destra idrografica. In sinistra idrografica, a meno

degli affluenti prossimi al centro storico, si registrano importanti spostamenti congruenti con quelli tiberini, mentre la destra idrografica risulta sostanzialmente stabile. Le differenze geologiche tra i due settori ha determinato una differente sedimentazione nei fossi tributari: l'elemento morfologico dell'alto di Monte Mario ha contribuito ad un ambiente fluviale ad alta energia, laddove il plateau vulcanico costituito dai prodotti vulcanici dei Colli Albani ed in ultimo dai depositi di lahar, ha impostato una sedimentazione a bassa energia e di materiale fortemente degradato.

Tale condizione determina un differente scenario di pericolosità in sinistra e in destra idrografica, localizzando i fenomeni di subsidenza e i relativi danni in una ben precisa porzione del territorio. Nell'ambito dei casi studiati, con dati geologici e geotecnici, nonché di danneggiamenti a conferma del dato telerilevato, si individua nell'area corrispondente al Fosso di Grotta Perfetta un fenomeno di subsidenza attiva difficilmente arginabile, laddove i depositi del Fosso delle Acque Mariane sono consolidati. L'intervento umano in questo tipo di fenomeni è piuttosto limitato e le soluzioni da adottare sono relative alle tecnologie di fondazione ed alla scelta di aree più sicure ed omogenee.

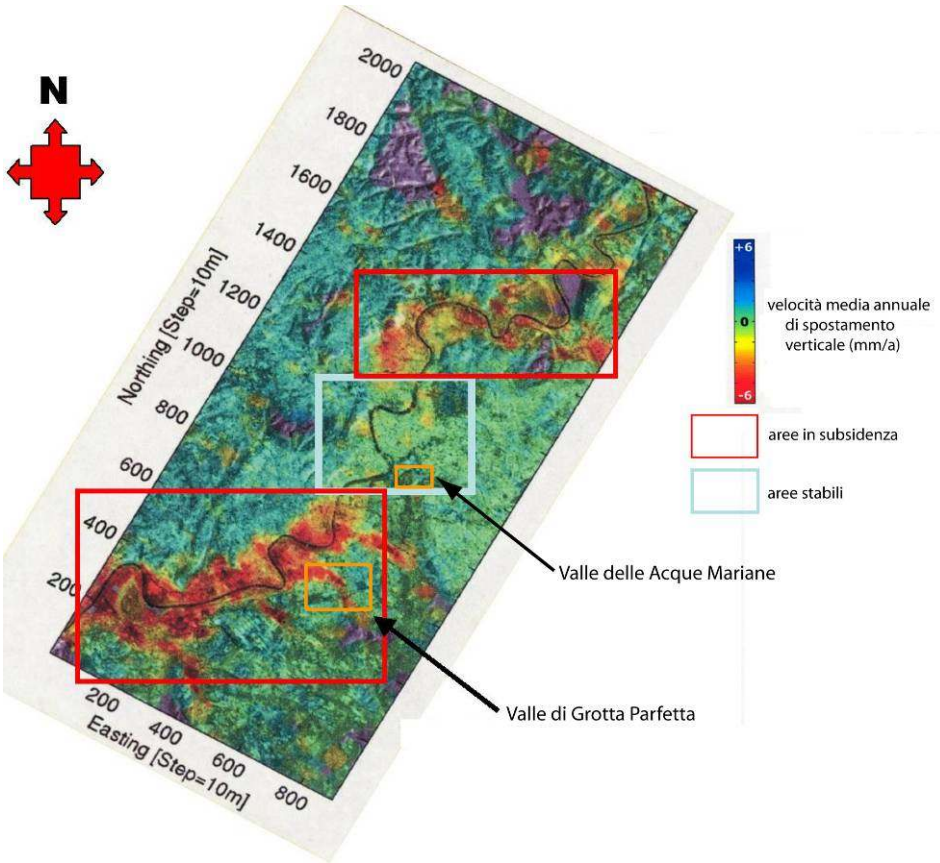


Figura 83 : Rilevi interferometrici dell'intervallo 1991-2000 dai satelliti ERTS1-ERTS2. Dati cortesemente forniti dalla Agenzia Spaziale Europea (da Campolunghi *et alii* 2007).

11. APPLICAZIONE IN WEBGIS

A completamento del lavoro di dottorato ed in particolare per illustrare una delle possibili applicazioni del progetto, si è sviluppato un applicativo in *WebGis*. Sostanzialmente una applicativo in ambiente *WebGis* è un programma in grado di visualizzare e di permettere l'interazione con mappe *raster* ed oggetti vettoriali tramite un *browser* (*Mozilla Firefox, Windows Explorer*, ecc) su rete locale o globale (*wordwilde*) con in più la caratteristica di operare in un ambiente georeferito proprio dei sistemi informativi geografici. Più semplicemente, una applicazione *WebGis* è la pubblicazione *web* di un GIS. Il progetto è stato perciò pubblicato in una pagina *web* locale, strutturata tramite codice HTML e si è permessa la navigazione del progetto, la possibilità di interrogazioni di base spaziali e per attributi, attraverso l'implementazione di un *file map* con *MapServer* versione 5.02.

11.1 Mapserver

Il *software MapServer* è in grado di lavorare in un ambiente multipiattaforma e costituisce l'ambiente di sviluppo *Open Source* per progettare applicazioni finalizzate alla pubblicazione su *web* di dati geospaziali.
MapServer è stato sviluppato dall'Università del Minnesota, inizialmente legato al progetto *ForNet* in cooperazione con la NASA e il Minnesota Department of Natural Resources (MNDNR). Il software è di libera distribuzione (*online* su http://mapserver.gis.umn.edu/) ed è un *Common Gateway Interface* (*CGI*), una tecnologia standard usata dai *web server* per interfacciarsi con applicazioni esterne. Il suo funzionamento base è legato ad un *file* ASCII di indicizzazione dei dati geografici disponibili su *server*, (mappa), che generalmente ha l'estensione .map ed attraverso la scrittura di tale *file* che è possibile la visualizzazione cartografica interattiva. Nel *file* .map i dati sono organizzati in *layers*, a loro volta divisi in una o più classi, per ognuna delle quali si possono definire diversi stili di visualizzazione. Questa struttura permette la generazione di cartografie con ampia flessibilità di definizione degli stili che possono anche dipendere dalla scala della mappa (da Wikipedia).

L'interfaccia grafica fornita da *MapServer* può essere migliorata progettando il mapfile con il *software Open Source Chamaleon* che permette di incorporare strumenti altamente personalizzabili per la visualizzazione delle mappe e dei dati ad esse connesse. In questa tesi si è preferito non lavorare con questo programma in quanto non migliorava dal punto di vista operativo le funzionalità del progetto, ma permetteva esclusivamente di costruire una interfaccia graficamente più evoluta e sofisticata, non necessaria al fine perseguito. Ciò non toglie che in un futuro sia interessante ed utile implementare alcune funzionalità in modo più "*friendly*" attraverso *Chamaleon*.

11.2 L'applicativo su Roma: il progetto di dottorato

L'applicativo sviluppato tramite *MapServer* del progetto di dottorato illustrato nei precedenti capitoli, è stato progettato presso l'Istituto di Geodesia e Fotogrammetria del Politecnico di Zurigo (ETH). Il lavoro principale è stato quello di scegliere quali informazioni era utile pubblicare al fine di illustrare il lavoro di dottorato e le potenzialità di questo tipo di applicazione.

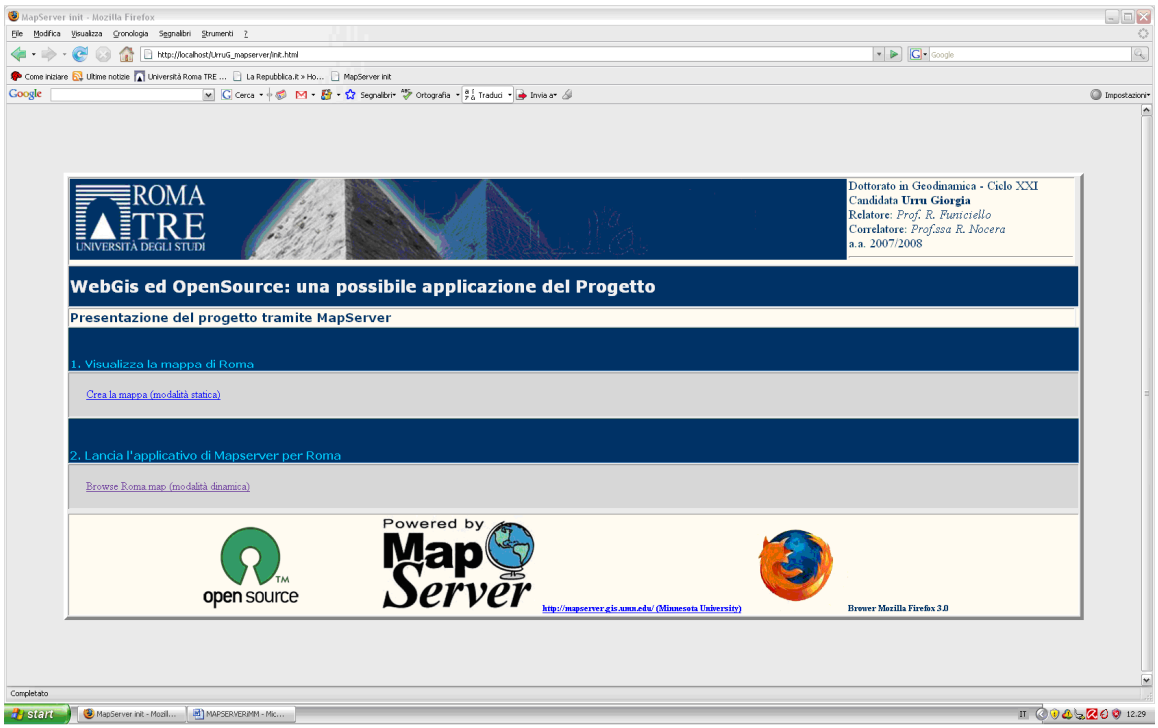


Figura 84: Pagina iniziale (init.html) da cui lanciare l'applicativo *WebGis* in modalità statica (1) e dinamica (2). La pagina è scritta nel linguaggio HTML ed il browser *open source* che la carica è Mozilla FireFox.

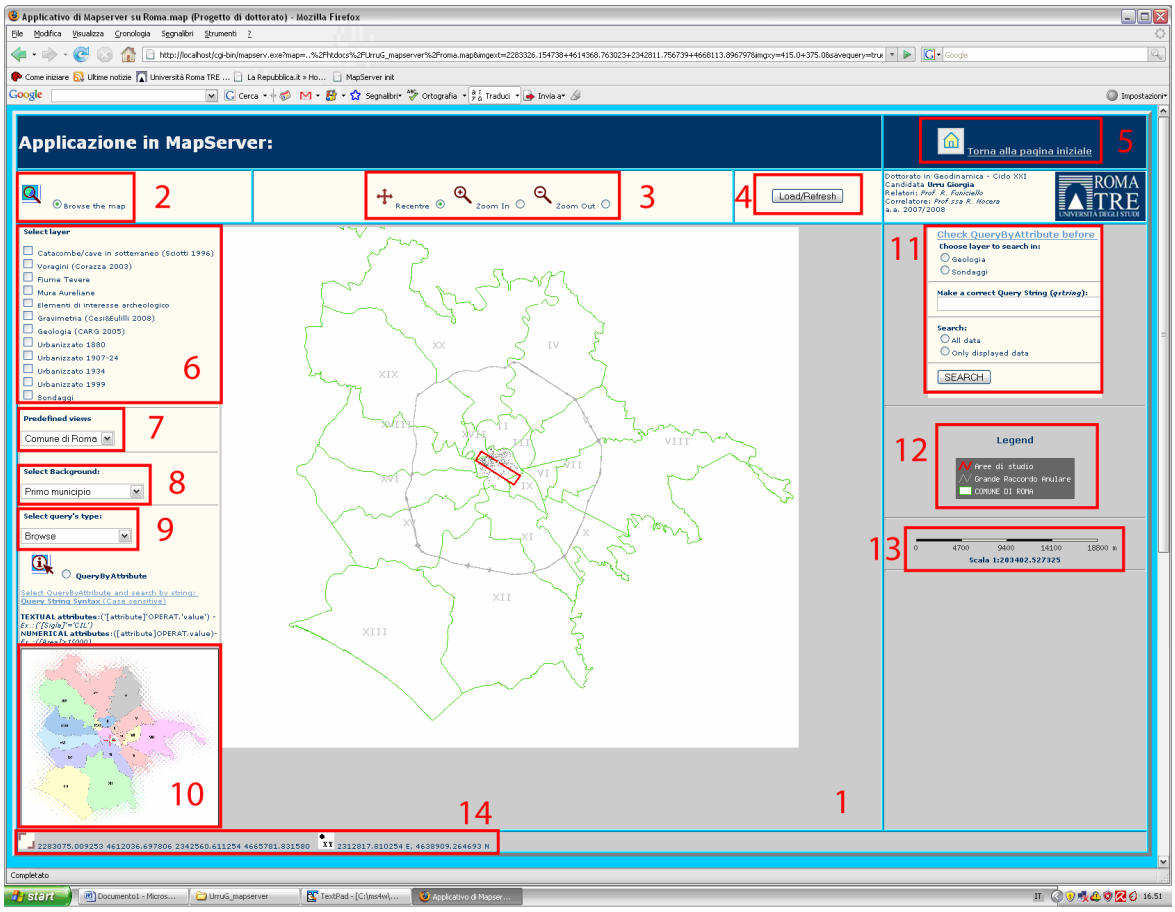


Figura 85: Pagina *web* (templ.html) per la visualizzazione della mappa in modalità interattiva, lanciata dalla pagina init.html (Fig. 84). La mappa e i suoi comandi e funzionalità sono scritte nel *file* map. In templ.html richiama il file map e definisce la distribuzione nella pagina dei vari elementi ed aree. Essa è così articolata ed organizzata in:

1. area di visualizzazione della mappa;
2. *radio button* per accedere alla modalità di navigazione della mappa;
3. *radio button* per spostare interattivamente la mappa (recentre) e ridimensionarla (zoom in-out),
4. tasto per rigenerare la mappa dopo aver selezionato diversi livelli per la visualizzazione;
5. tasto che permette di ritornare alla pagina iniziale init.html (Fig. 84)
6. livelli che sono selezionabili ai fini della visualizzazione, in questo caso nessuno dei *layers* è selezionato e la mappa è costituita dai *layers* in visualizzazione permanente, decisi durante la progettazione dell'applicativo;
7. menù a scelta di diverse scale di visualizzazione predefinite (vedi Fig. 86a);
8. menù a scelta per le immagini raster di *background* da visualizzare (vedi Fig. 86b);
9. ;menù a scelta sulle opzioni di interrogazione spaziale sui *layers*;
10. mappa di riferimento che indica dove è localizzato a scala minore il punto in cui si sta navigando sull'area della mappa;
11. serie di strumenti da selezionare e compilare per effettuare interrogazioni per attributi;
12. legenda dinamica che si aggiorna ogni volta che si seleziona /e seleziona un livello o una vista;
13. scala dinamica della mappa che si aggiorna con il ridimensionamento o il cambio di vista;
14. a sinistra, coordinate piane nel sistema Roma40, Gauss Boaga Fuso E, dell'estensione geografica di riferimento della mappa; a destra coordinate piane X, Y, (dinamiche) del punto indicato di volta in volta sulla mappa, puntato con il mouse.

Si è dapprima costruita una pagina *web* iniziale (*file* init.html - Fig. 84) tramite un *editor* HTML. Da questa pagina è possibile accedere in modo statico o dinamico alla mappa

attraverso la chiamata del *file* map. Il modo statico visualizza la mappa di base con i soli *layers* visibili e non è interattiva. La visualizzazione dinamica, al contrario, è interattiva e permette all'utente di interagire con la mappa anche attraverso interrogazioni di vario tipo (*queries*).Il modo dinamico viene implementato in una pagina HTML (*file* templ.html – Fig. 85).

Nel codice HTLM viene scritto la modalità di accesso al *file* map ed in quale posizione verranno visualizzati la mappa, gli strumenti e gli oggetti ausiliari della mappa stessa (mappa di riferimento, scala dinamica, legenda dinamica, zoom in, zoom out, viste di riferimento, modalità di interrogazione, ecc). Gli strumenti ausiliari alla navigazione sono quelli di base e sono di seguito elencati (Fig. 85):

- *Browse the map* – è il modo che permette la navigazione della mappa; quando non è attivo si possono effettuare solo le interrogazioni.
- *Torna alla pagina iniziale* – permette di ritornare alla pagina iniziale init.html.
- *Recentre* – centra la mappa rispetto al punto c*lickato* con il *mouse*.
- *Zoom in* – permette di ingrandire la mappa di due volte ad ogni *click* del *mouse.*
- *Zoom out* - permette di ridimensionare la mappa di due volte ad ogni *click* del *mouse.*
- *Load/Refresh* – rigera la mappa e la aggiorna alle ultime modifiche.
- *Select Layer* – permette la selezione dei layer che si vogliono visualizzare nella mappa e che vengono di consegueza aggiunti alla legenda. Una volta selezionati è necessario rigenerare la mappa per visualizzare le modifiche.
- *Predefined views* – consente la selezione di viste predefinite della mappa. Si è previsto che il progetto sia visualizzabile alla scala del Comune di Roma, a quella del I Municipio, dove sono presenti i sondaggi delle tratte T2 e T3 della nuova linea C della metropolitana implementati nel *geodatabase*, a quella dell'area di dettaglio di Porta Metronia ed infine a quella dell'ultima vista che si è effettuata.
- *Select background* – dà la possibilità all'utente di scegliere cosa visualizzare come sfondo. Nel progetto specifico si sono inserite le immagini *raster* relative alla cartografia Cartesia Spa, 1:5000, utilizzate all'interno dell'Ufficio cartografico del XII Dip.to del Comune di Roma. E' possibile inserire anche ortofoto ed immagini telerilevate (formati accettati *jpeg, tiff, gif*).

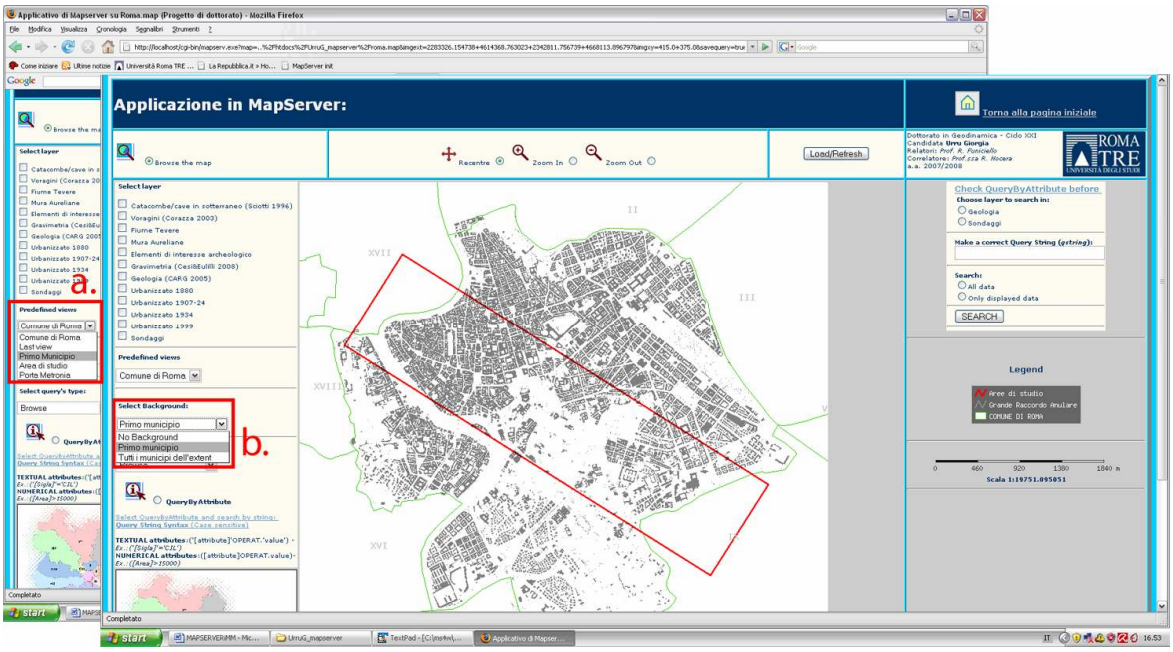


Figura 86: Menù di scelta rapida per le viste predefinite a scala diversa **(a.)** e per le immagini raster di *background* **(b.)**. Nella visualizzazione della mappa appare la vista alla scala del Municipo I (1:19751) del Comune di Roma, con in *background* il corrispondente raster.

- *Select query's type* – riguarda la selezione del modo che permette le interrogazioni dirette sulla mappa in seguito al puntamento e *click* del *mous*. Si può scegliere se interrogare un solo *layer* (*single layer*) o diversi *layers* (*multiple layers*).
- *Query by Attribute* (metodo *qstring*) – consente di attivare le interrogazioni tematiche; per formulare la query e selezionare il *layer* interrogabile, bisogna compilare l'area mostrata in Figura 85.11 (vedi testo più avanti).
- *Reference Map* – è la mappa di riferimento rispetto alla quale si può individuare la posizione della finestra di visualizzazione della mappa. Oltre una certa scala sia di dettaglio sia di generalizzazione, la posizione non è più visualizzabile in quanto non apprezzabile visivamente o fuori dai limiti geografici della mappa di riferimento.
- *Legend*a – costituisce la legenda dei *layers* visualizzati nella mappa, che si aggiorna in modo dinamico; i *layers* visualizzabili a scelta nell'area *select layers* e quelli in visualizzazione permanente sono determinati in funzione del livello di fruizione e della finalità del progetto.
- *Scalebar* – è la scala di riferimento della mappa, che segue dinamicamente la mappa aggiornandosi ad ogni cambiamento di vista.

- *Full extent coordinate* – sono le coordinate iniziali della mappa, impostate nel *file map* e nel sistema di riferimento nazionale Roma40, proiezione cartografica Gauss Boaga, fuso Est.
- *Point coordinate* – sono le coordinate piane del punto individuato dal puntamento e *click* del *mouse*, espresse nel sistema di riferimento della mappa, come latitudine rispetto al N e come longitudine rispetto all'Est.

Quando si attiva la modalità di interrogazione (vedi Figg. 85.10 e 85.11) viene necessariamente disattivata la modalità di navigazione della mappa e viene chiamata la pagina query.html che contiene i risultati della interrogazione appena eseguita nel caso in cui essa restituisca dei valori, oppure la pagina voidqy.html se l'interrogazione è vuota, cioè nel caso in cui non restituisca alcun valore.

Le interrogazioni possono essere spaziali e riguardare un solo livello informativo (*single layer*) o più (*multiple layers*) tra quelli nella mappa, oppure di tipo tematico (o per attributi), da effettuare su un singolo livello tra quelli interrogabili. La pagina che viene restituita contiene le informazione sul nome del livello/i selezionato/i e sui singoli elementi selezionati di quel livello, visibili sia come risultato sulla mappa, sia come valori degli attributi della tabella associata agli stessi elementi. Le possibili *query* sono decise a priori da chi sviluppa l'applicativo e dipendono dalla struttura delle tabelle associate al *file* vettoriale.

Nel procedere nelle interrogazioni per attributo bisogna conoscere non solo la struttura dei dati ma anche le specifiche occorrenze. La sintassi di interrogazione è *case sensitive* ossia risente dei caratteri usati (minuscolo-maiuscolo) ed è necessario adottare una specifica formulazione in base al formato dell'attributo richiesto, determinando i seguenti casi:

1. *Query* numerica: *([nome esatto dell'attributo] OPERATORE MATEMATICO occorrenza specifica dell'attributo)*

   es: per le informazioni su quali sondaggi hanno un lunghezza maggiore di 30 m, selezionare il *layer* sondaggi (Fig.) e formulare la *query* come: ([tot_m]>30,

2. *Query* alfanumerica (tipo stringa): *('[nome esatto dell'attributo]'OPERATORE LOGICO 'occorrenza specifica dell'attributo')'*

   es: per visualizzare tutti gli affioramenti di depositi alluvionali, selezionare il *layer* geologia, e compilare nell'apposita area (Fig.) la *query*: ('[SIGLA]'='ba').

Per le *query* per attributo è possibile scegliere se l'interrogazione riguardi tutti i dati o solo quelli che sono visualizzati in quella determinata estensione della mappa.

I livelli vettoriali (*shape file*) implementati nel progetto presentato, in modalità di visualizzazione permanente, sono stati:

1. Limiti amministrativi (poligoni) del Comune di Roma corrispondenti alle circoscrizioni (Municipi);
2. Limite dell'area di studio(poligoni);
3. Grande Raccordo Anulare, GRA (linee).

Sono stati poi implementati nel progetto dei livelli vettoriali in modalità di visualizzazione selezionabile e sono (Figura 85.6):

4. Sondaggi (punti) presenti nel *geodatabase*;
5. Geologia (Funiciello & Giordano) (poligoni) per l'area di studio;
6. Ubicazione delle voragini (punti) (Corazza 2003);
7. Ubicazione delle cavità antropiche (punti) (Sciotti 1996);
8. Mappa delle anomalie di Bouger (linee) (Cesi *et alii* 2008);
9. Reticolo idrografico del fiume Tevere (linee);
10. Percorso delle Mura Aureliane (linee);
11. Edifici e manufatti archeologici (linee).

Infine sono stati inseriti dei livelli *raster*, selezionabili nel menù *background* e corrispondenti alla cartografia 1:5000 dei municipi del Comune di Roma.

Per quanto riguarda le interrogazioni possibili, si è scelto di rendere interrogabili i livelli dei Sondaggi (4-"SONDAGGI"), Geologia (5-"carg") e Municipi (1-"municipi"). Per tali *shape files*, le informazioni restituite attraverso *queries* spaziali o interrogabili attraverso *queries* per attributi sono le seguenti: livello (4) codice identificativo del sondaggio (cod_id), codice originario (v_cod), quota di boccapozzo (q_slm) in metri sul livello del mare e lunghezza totale (tot_m) in metri del sondaggio; (5) nome della formazione (Formazione), sigla (SIGLA) e area del poligono (Shape_Area) in km^2; (1) numero del municipio (CIRCOSCRIZ) e area del poligono (Shape_Area) in km^2.

In definitiva i livelli interrogabili ed il tipo di informazioni restituibili sono definite, nonché limitate e vincolate a monte del progetto in base alla finalità dell'applicativo ed alla fruibilità che gli si vuole dare.

La Figura 87 rappresenta i risultati della interrogazione spaziale di un solo livello (quello sopra a tutti), mentre la Figura 88, di quella su più livelli (ossia tutti quelli interrogabili, Sondaggi, Geologia, Municipi). Nel secondo caso la pagina Web ripete per tre volte, tante quanti sono i livelli selezionati, la sua struttura: tabella con gli attributi e mappa.

La Figura 89 restituisce le occorrenze della interrogazione per attributi sul livello geologia ("carg"), tali che [SIGLA] sia uguale a LTT, ossia alla formazione vulcanica di La Storta. Per effettuare correttamente le interrogazioni per attributo è necessario conoscere i nomi dei campi attributo e la loro esatta scrittura, il formato di tali attributi ed i valori specifici che assume nello *shape file*.

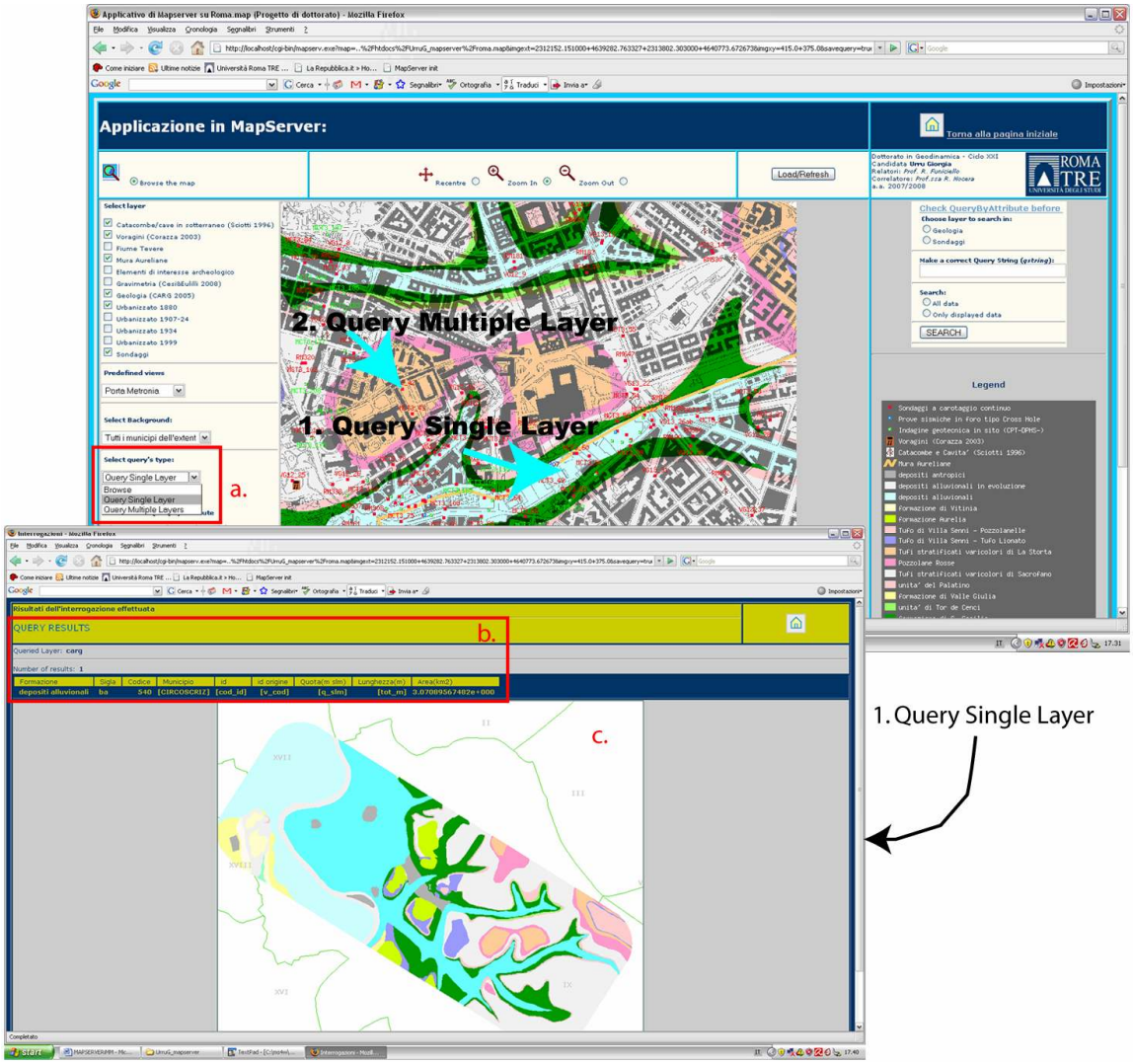


Figura 87: Pagina Web esemplificativa della mappa interrogabile (in alto), con menù di scelta sul tipo di interrogazione spaziale **(a.)**: per avere informazioni su un singolo livello, ovvero il primo interrogabile presente nel *map file*, o su tutti i livelli interrogabili e visibili nella mappa; 1. e 2. indicano i rispettivi punti di interrogazione: nella pagina sottostante sono rappresentati i risultati della *query single layer* sia in termini di attributi **(b)**, sia in termini geometrici **(c.)**. Nel punto 1. è stato selezionato l'elemento poligonale formazione dei depositi alluvionali, sigla ba, codice = 540 la cui area è pari a 3.07 km^2; i campi che non appartengono al livello "carg", visualizzano il nome esatto dell'attributo nel livello ad esso corrispondente.

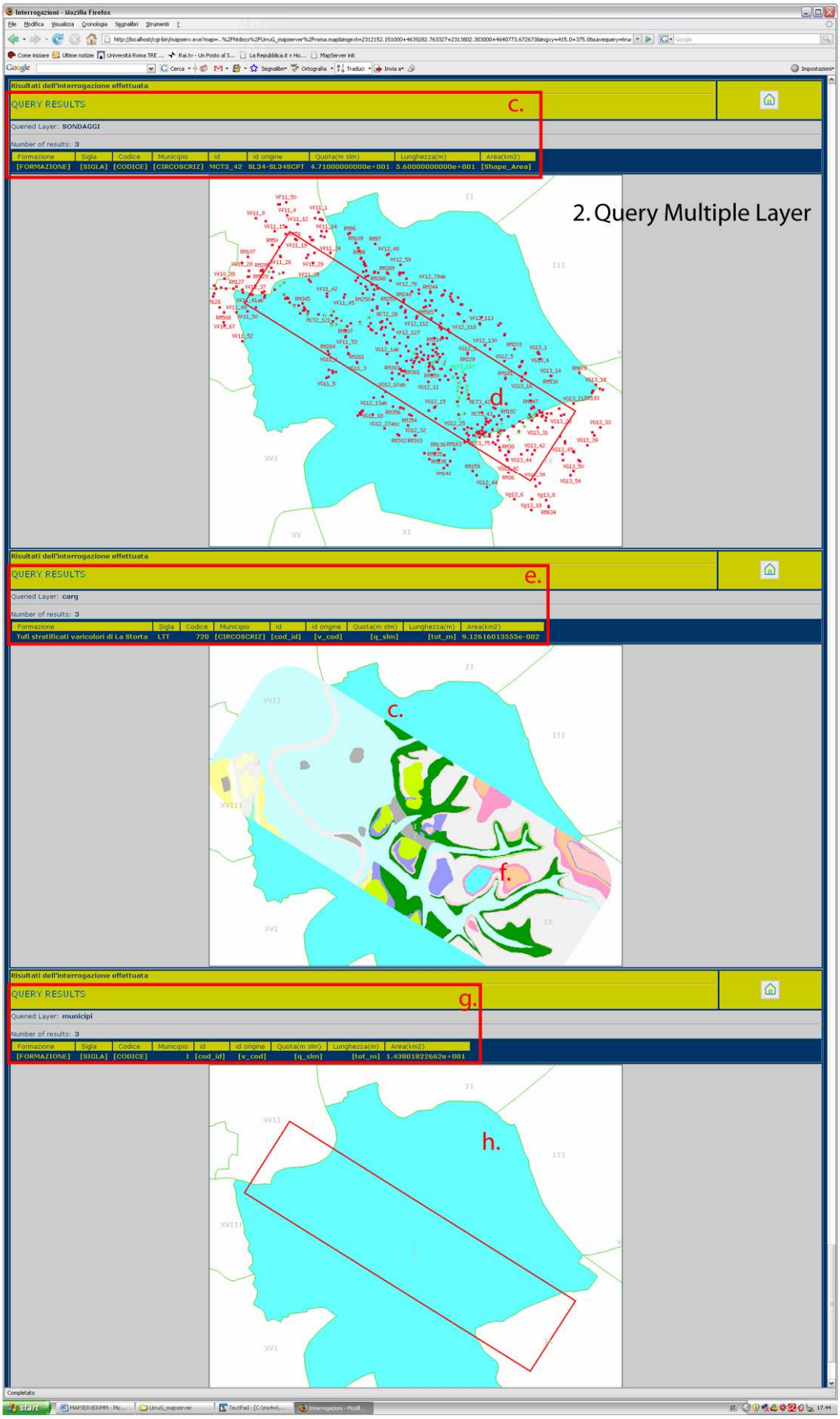

Interrogazioni - Mozilla Firefox
Risultati dell'interrogazione effettuata
QUERY RESULTS
c.
Queried Layer: SONDAGGI
Number of results: 3
Formazione | Sigla | Codice | Municipio | id | id origine | Quota(m slm) | Lunghezza(m) | Area(km2)
[FORMAZIONE] | [SIGLA] | [CODICE] | [CIRCOSCRIZ] | MCT3_42 | SL34-SL34SCPT | 4.71000000000e+001 | 5.60000000000e+001 | [Shape_Area]
2. Query Multiple Layer
d.
Risultati dell'interrogazione effettuata
QUERY RESULTS
e.
Queried Layer: carg
Number of results: 3
Formazione | Sigla | Codice | Municipio | id | id origine | Quota(m slm) | Lunghezza(m) | Area(km2)
Tufi stratificati varicolori di La Storta | LTT | 720 | [CIRCOSCRIZ] | [cod_id] | [v_cod] | [q_slm] | [tot_m] | 9.12616013555e-002
c.
f.
Risultati dell'interrogazione effettuata
QUERY RESULTS
g.
Queried Layer: municipi
Number of results: 3
Formazione | Sigla | Codice | Municipio | id | id origine | Quota(m slm) | Lunghezza(m) | Area(km2)
[FORMAZIONE] | [SIGLA] | [CODICE] | I | [cod_id] | [v_cod] | [q_slm] | [tot_m] | 1.43001822662e+001
h.

Figura 88: Pagina *Web* che visualizza il risultato della interrogazione spaziale "*2. Query Multiple layer*".: i livelli che risultano selezionati sono 3: dall'alto verso il basso, abbiamo i *layers* sondaggi, geologia e municipio; **(c)** mostra gli attributi relativi al livello "SONDAGGI"(nome esatto *case-sensitive* del *file* che contiene i sondaggi), dell'elemento puntuale selezionato: id = MCT3_42, v_cod = SL34-SL34SCPT, alla quota di 47.1 metri slm e di 56 metri di lunghezza (in **d.** visualizzazione del risultato sulla mappa); (e) mostra gli attributi relativi all'elemento poligonale del secondo livello selezionato (*layer* geologia, *file* "carg") in corrispondenza dello stesso punto di selezione, appartenente alla formazione dei tufi stratificati varicolori di La Storta, sigla = LTT, codice = 720 con area di $9.1 \cdot 10^{-2}$ km^2 (in **f.** la restituzione dell'elemento sulla mappa); infine **g.**, visualizza le informazioni relative al terzo livello interrogato, corrispondente al *file* "municipi", del poligono municipio=I con area di 14.38 km^2 (visualizzato sulla mappa in **h.**). E' da notare che gli attribuiti non restituiscono necessariamente i valori solo di un determinato livello. Shape_Area è, per esempio, un attributo sia della tabella "carg" sia della tabella "municipi". Perciò il valore che verrà visualizzato nella pagina dei risultati si riferirà all'area del poligono "carg" quando è questo il livello selezionato, o all'area del poligono "municipi" quando si selezionerà questo ultimo.

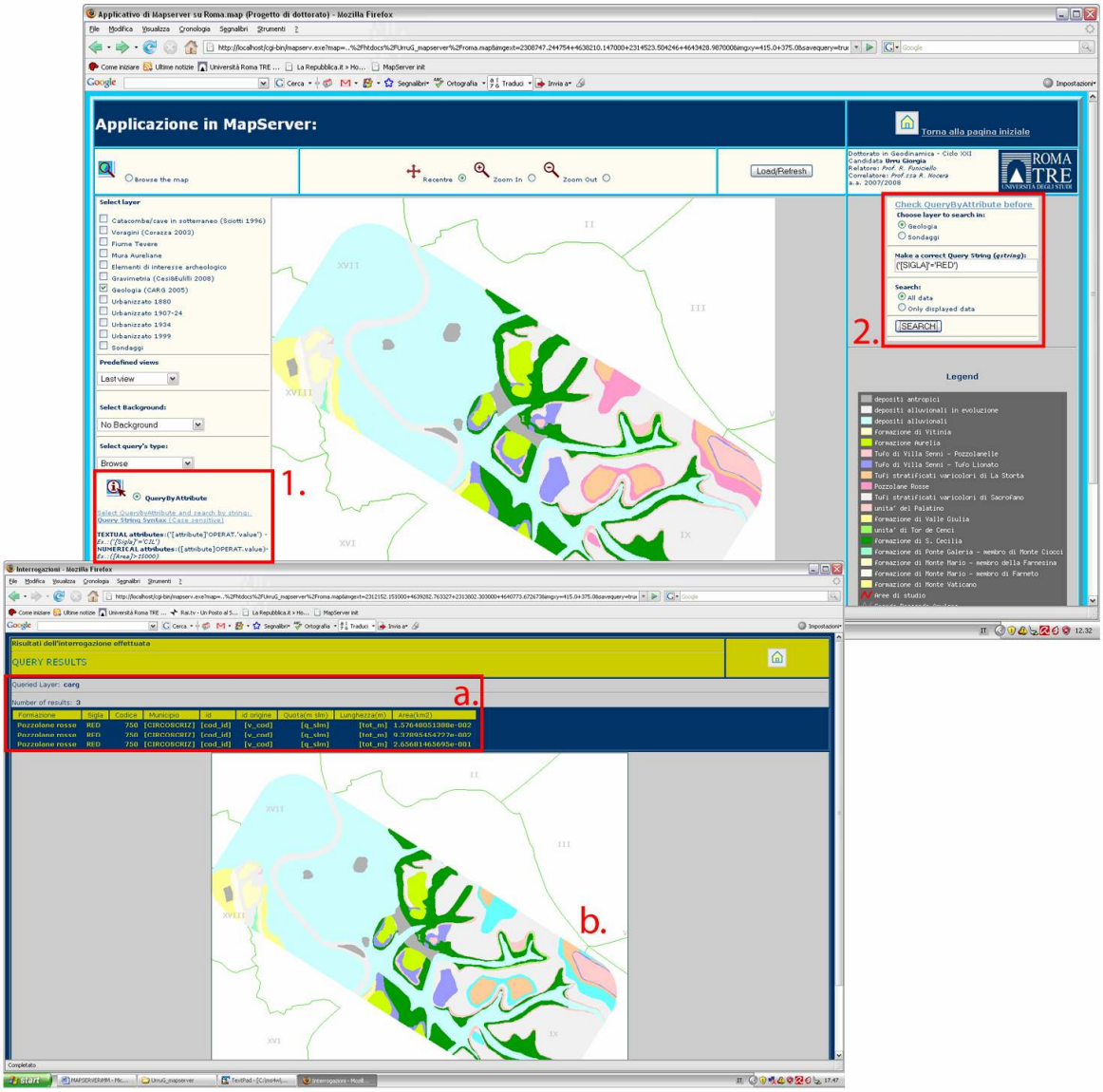


Figura 89 : Esempio di Pagina *Web* (in alto) in cui è stata formulata una interrogazione tematica per attributi. La procedura da seguire è selezionare in 1. il *radio button QueryByAttribute*, poi in 2. selezionare il livello da interrogare tra quelli disponibili, in questo caso "geologia", formulare correttamente la *query* per ottenere tutti i poligoni relativi ai tufi stratificati varicolori di La Storta (LTT). A questa condizione corrispondono tre poligoni del livello "carg" (**a.**), visualizzate geograficamente in **b.**.

L'interfaccia di visualizzazione, in particolare per i risultati delle *queries*, è migliorabile e può essere resa di aspetto più gradevole attraverso l'utilizzo di linguaggi di programmazione *WebGis* più avanzati graficamente (per es. *Chamaleon*), non affrontati in questa sede perché non pertinenti alle finalità prime di questa Tesi.
Dal momento che l'applicazione utilizza *MapServer*, il progetto è visualizzabile in modo interattivo ed interrogabile, ma non è possibile effettuare nessuna analisi suppletiva da parte degli utenti o di manipolazione dei dati. In tal modo vengono pubblicati solo i dati ed i risultati e questo garantisce da una parte la fruibilità dell'informazione senza inficiarne l'integrità e la consistenza e dall'altra preserva la riservatezza e la proprietà dell'informazione stessa.

Si è scelto quindi di concludere il lavoro di Dottorato mettendo in evidenza un aspetto di grande fruibilità del progetto nel senso della visualizzazione interattiva e condivisione di semplici informazioni. Tramite la realizzazione di un *WebGis* base con il *software Open Source*, Mapserver 5.2.0, si è mostrato la versatilità e potenzialità del progetto a diventare di rapida e facile consultazione anche da parte di persone non esperte del settore. Lo sviluppo di tale applicativo fa sì che i dati diventino uno strumento di ausilio immediato e interattivo nel processo di *decision making* relativo alla pianificazione territoriale e di informazione diretta con tutela della consistenza e della proprietà, riservatezza dei dati.

12. CONCLUSIONI

Gli studi metodologici e la ricostruzione di scenari rappresentativi, rivestono una grande importanza nella valutazione delle pericolosità geologiche, soprattutto per la previsione, prevenzione e mitigazione dei rischi che possono potenzialmente coinvolgere le attività e la sicurezza, in senso lato, della popolazione. In ambiente urbano, dove lo sviluppo storico del sistema insediativo ha modificato in modo incisivo il territorio e dove l'ambiente naturale è spesso obliterato o tenuto in poca considerazione, diventa fondamentale la definizione dell'evoluzione di fenomeni geologici attraverso un approccio multidisciplinare, in grado di integrare in modo funzionale le informazioni spaziali, qualitative e quantitative disponibili.

12.1 PRINCIPALI RISULTATI OTTENUTI

Il lavoro sviluppato in questa Tesi di Dottorato si inserisce nel contesto della valutazione delle pericolosità geologiche in ambito urbano. In particolare, esso focalizza l'attenzione sulla fase di lavoro preliminare che riguarda la raccolta dei dati di base e le conoscenze pregresse sul fenomeno geologico d'interesse. Sostanzialmente il progetto di Ricerca si incentra sulla valorizzazione della risorsa dei dati geologico-geotecnici e sul loro uso integrato, mirando alla parametrizzazione più completa possibile del volume di territorio suscettibile a fenomeni naturali e non, che determinano un rischio. A livello metodologico, l'approccio consiste:

1. nella modellizzazione del sottosuolo dal punto di vista geologico-stratigrafico e geotecnico, con attenzione alle proprietà sismiche dei terreni;
2. nella modellizzazione delle modificazioni quantitative del territorio nel tempo e nello spazio attraverso la ricostruzione da cartografia storica, georeferenziata, digitalizzata delle superfici topografiche e dell'uso del suolo;
3. nella costruzione del *database* dei dati spaziali e tematici che rappresentano i fattori di pericolosità geologica relativa ai processi di crollo per instabilità di cavità, di subsidenza geotecnica, di amplificazione sismica, di instabilità di versante, sviluppato in ambiente G.I.S.

4. nella predisposizione dei dati e delle informazioni necessarie alle fasi successive di approfondimento attraverso metodologie specifiche per la modellizzazione di scenari di rischio.

Tale approccio metodologico permette la gestione organica e strutturata di grandi quantità di dati relativi a diverse aree tematiche, il loro aggiornamento, la loro manipolazione e la loro interrogabilità attraverso *queries* spaziali, tematiche o miste, preservandone sempre l'integrità e la consistenza. La modellizzazione concettuale del sottosuolo, delle modificazioni topografiche nel tempo e nello spazio, e la definizione di un G.I.S *ad hoc* per affrontare le problematiche relative alla pericolosità geologica urbana, consentono di ricostruire in tempi contenuti, un quadro generale delle informazioni disponibili sul territorio, dalla superficie topografica fino alla profondità media di 30 metri dal piano campagna, ed individuare le aree che necessitano di approfondimento sia per quantità di dati sia per qualità sia per tematismo.

In particolare è possibile una analisi speditiva del territorio dal punto di vista geotecnico. Rappresentando le informazioni geotecniche in condizioni statiche e dinamiche attraverso dati provenienti da prove in sito e di laboratorio, le caratteristiche stratigrafiche-litologiche dei terreni si relazionano alle corrispondenti proprietà fisiche-meccaniche. In questo modo, l'informazione territoriale si arricchisce in modo significativo e si consente di interrogare i dati in base non solo alla profondità ed al litotipo, ma anche attraverso i valori di parametri geotecnici puntuali di rilevanza per la definizione della pericolosità geologica. La validità del sistema informativo così definito è stata testata su due località della città di Roma, bene distinte sia dal punto di vista geologico sia da quello del loro sviluppo urbanistico.

In questa verifica è stato constatato che la modellizzazione del sottosuolo risulta dipendente dall'interpretazione stratigrafica e dalla ricostruzione stratigrafica. A partire da essa si possono definire diverse rappresentazioni del sottosuolo per lo stesso set di dati. Tale informazione basata, in prima analisi, sull'informazione litologica di cantiere, si fonda sulla geologia di superficie "Carta geologica Foglio 374 Roma, 1:10000 (Giordano & Funiciello 2005) e sull'evoluzione geologica dell'area romana. Ad ogni modo l'integrazione con l'informazione geotecnica fa sì che si definiscano dei modelli del sottosuolo fondamentalmente simili, dove le variazioni dei limiti stratigrafici sono di entità trascurabile ai fini della rappresentazione della realtà geologica del sottosuolo (inferire a ± 5 metri).

La banca di dati spaziali che viene proposta in questa tesi vuole essere il nucleo di base espandibile ed integrabile con moduli specifici, da cui può e dovrebbe iniziare il processo di conoscenza puntuale del nostro territorio.

Nell'ambito dei due *case histories*, (Fosso delle Acque Mariane, Fosso di Grotta Perfetta), l'approccio multidisciplinare adottato ha evidenziato:

1. la funzionalità del *geodatabase* a fornire dati riguardanti un punto specifico in modo simultaneo e completo, integrando i diversi tematismi e favorendo la correlazione tra i diversi fattori di pericolosità e la loro individuazione spaziale;
2. l'importanza del modello di elevazione del terreno (DEM a 5 metri) come base per la corretta interpretazione del sottosuolo e dei fenomeni superficiali;
3. l'ausilio delle sezioni geologiche per l'interpretazione stratigrafica e per vincolare l'elaborazione delle superfici stratigrafiche principali ad un maggior numero di dati;
4. il ruolo della cartografia storica non solo per la ricostruzione delle modificazioni del terreno, ma anche per l'interpretazione e la comprensione delle informazioni geologiche, in particolare in corrispondenza di paleofossi e laddove è possibile estrapolare la superficie geologica;
5. l'importanza della definizione dello spessore dei terreni di riporto e della loro età di messa in posto come aiuto alla comprensione dei dissesti superficiali ad essi connessi tramite l'integrazione dell'informazione topografica attuale, storica e stratigrafica del sottosuolo;
6. l'importanza della caratterizzazione statica e dinamica, integrata alla fondamentale informazione idrogeologica sulla presenza e circolazione delle acque di falda, per una più completa ed attenta definizione dei fattori territoriali che incidono sull'evoluzione dei processi connessi alle pericolosità geologiche.

Nello specifico, il caso del Fosso sepolto delle Acque Mariane ha determinato una pericolosità geotecnica sismica medio-alta, legata in parte agli spessori dei terreni di riporto, in media intorno ai 15 metri, e in parte allo spessore dei depositi alluvionali olocenici ed di quelli in facies argilloso-limoso-sabbiosa pleistocenici relativi alla formazione di S. Cecilia, con spessori totali di 20 metri. I depositi di riporto e i depositi alluvionali olocenici mostrano dei valori costanti con la profondità del parametro di rigidezza compreso tra i 90 e i 150 MPa.

Per quanto riguarda il Fosso di Grotta Perfetta, incanalato al di sotto di uno spessore variabile tra i 5-12 metri di terreni di riporto scadenti, i suoi depositi alluvionali, in particolare i depositi saturi e ricchi in materia organica, sottoconsolidati, compresi tra i 10-11 metri fino ai 30 metri dal piano campagna, presentano dei valori medi della rigidezza, inferiore ai 30 MPa. Il processo di subsidenza e la pericolosità associata è riproposta in questi studi e dai nuovi dati.

Viene quindi confermata la spiccata predisposizione dei fossi in riva sinistra ed in particolare di quelli in cui il processo di urbanizzazione è riferibile agli anni del secondo dopoguerra, ad ospitare fenomeni di amplificazione sismica così come indicato dagli studi qualitativi e macrosismici e l'esaurimento dei processi di consolidazione nei depositi alluvionali in corrispondenza del centro storico. Inoltre si evidenzia un comportamento fortemente non lineare degli stessi depositi che predicono un elevato fattore di smorzamento. Per giungere ad una microzonazione sismica del territorio è quindi necessario un approfondimento di analisi.

10.2 LIMITI E POTENZIALITÀ DELLA METODOLOGIA PROPOSTA: SVILUPPI FUTURI

L'organizzazione e la correlazione delle informazioni che riguardano il complesso sistema territorio-uomo è alla base di qualsiasi valutazione di pericolosità geologica. La risorsa dei dati relativi al territorio sia di tipo naturale che di tipo antropico, costituisce la pietra miliare su cui costruire l'approccio sistematico ed integrato alle problematiche connesse all'evoluzione dei processi naturali o diretti dall'uomo. Lo scopo di questa Tesi di Dottorato è consistito nell'armonizzare e rendere fruibile tale risorsa sia dal punto di vista tematico sia dal punto di vista spaziale-territoriale.

Il modello concettuale proposto e più in generale l'approccio metodologico illustrato rappresentano un primo passo di un processo ampio e complesso di valutazione quantitativa e puntuale delle pericolosità geologiche che interessano il tessuto urbano in città con uno sviluppo urbanistico secolare, modellizzando sia le componenti naturali geologiche (il sottosuolo, la superficie terrestre, l'idrogeologia), sia quelle antropiche (cavità, edifici, manufatti archeologici, strade).

Il carattere più rilevante del sistema informativo territoriale progettato e realizzato consiste nell'essere indipendente dalla particolare metodologia che si decide di adottare per la valutazione della pericolosità. Questo comporta una ampia applicabilità del modello e ne

conferma le potenzialità, fornendo una struttura di dati semplice, integrabile e soprattutto valida a prescindere dallo specifica applicazione.
Un possibile sviluppo futuro del lavoro è sicuramente rappresentato dall'integrazione con ulteriori tematismi, quali le informazioni sulle reti delle infrastrutture (in particolare, condotte idriche e fognature), sulla meteorologia (intensità e durata delle piogge, direzione dominante dei venti, ecc), connettendo il sistema informativo territoriale progettato con altre banche dati o inserendo nuove tabelle o raffinando quelle esistenti.
Nell'ambito della pericolosità, geotecnica sismica in particolare, affrontata solo in modo preliminare nei *case histories* presentati, si potrebbe proseguire nell'approfondimento del comportamento sismico dei terreni di riporto, i cui spessori possono influenzare sensibilmente la risposta sismica locale.

Le risorse umane, indispensabili nella fase di raccolta, inserimento, interpretazione ed elaborazione dei dati, e il progresso tecnologico che può fornire il supporto all'estensione delle potenzialità *software* e *hardware*, definiscono chiaramente i punti sensibili nell'attuazione e sviluppo futuro del progetto.
Nel futuro si potrà pensare ad uno sviluppo dell'applicativo *WebGis* di base presentato nel Capitolo 11, secondo un più alto livello di funzionalità, nell'ottica della visualizzazione interattiva e per una maggiore fruibilità, protezione e condivisione dei risultati ottenuti o degli stessi dati.

BIBLIOGRAFIA

ACOCELLA V. & FUNICIELLO R. (2006) – *Transverse systems along the extensional Tyrrenian margin of central Italy and their influence on volcanism*. – Tectonics 25, TC2003, doi:10.1029/2005TC001845

ADAMS T.M., WIEGAND N. (1994) - *Object-oriented database management for geotechnical applications.* - Geotechnical News June, 44–47.

ALBERICO I., PETROSINO P., ZENI G., D'ANDREA F. & LIRER L. (2005) – GEOCITY: a drill-hole database as a tool to assess geological hazard in Napoli urban area. – Environ. Geol., 47, 751-762, DOI 10.1007/s00254-004-1199-5

ALVAREZ W. (1972) - *The Treia valley north of Rome: volcanic stratigraphy topographic evolution and geological influences on human settlement*. Geol. Rom., 11, 153-176.

AMANTI M., CRESCENZI R., GISOTTI G., PECCI M., PIRO M. & VALLESI R. (1995) – *Dissesti a Roma* – in La geologia di Roma. Il Centro storico, Mem. Descr. Della Carta Geol. D'Italia, Vol L, 224-226, Servizio Geologico d'Italia, IPZS

AMANTI M., CARA P. & PECCI M. (1995) – *Modello digitale della superficie reale del centro storico della città di Roma.* – in La geologia di Roma. Il centro storico, Mem. Descr. Della Carta Geol. D'Italia, Vol L, 309-319, Servizio Geologico d'Italia, IPZS

AMANTI M. (2005) – *Inventari sulle frane in Italia e nel mondo come strumenti per la valutazione e la riduzione del rischio.* – in Secondo Forum Naz.: Rischio di frana e assetto idrogeologico nei territori collinari e montani. Questioni, metodi, esperienze a confronto. A cura di FERRUCCI M. & ZAINI O., Maggioli Ed.

AMANTI M., CESI C. & VITALE V. (2008) – *Le frane nel terrirorio di Roma* - in La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia*.,* Mem. Descr. Della Carta Geologica d'Italia, Vol LXXX, APAT Servizio Geologico d'Italia, 83-117

AMATO A., DE SIMONI B. & GASPARINI C. (1984) – *Considerazioni sulla sismicità dei Colli Albani* – Atti del 3° Convegno del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, CNR, Roma, 2, 965-976

AMBROSINI S., CASTANETTO S., CEVOLAN F., DI LORETO E., FUNICIELLO R., LIPARI L. & MOLIN D. (1986) – *Risposta sismica dell'area urbana di Roma in occasione del terremoto del Fucino del 13-1-1915*. – Mem. Soc. Geol. It. 35, 445-452

AMBROSETTI P. & BONADONNA F.P. (1967) - *Revisione dei dati sul Plio-Pleistocene di Roma*. - Atti Accad. Gioenia di Sc. Nat. in Catania, 18, 33-70

ANZIDEI M., CARAPEZZA M.L., ESPOSITO A., GIORDANO G., TARCHINI L. & LELLI M. (2008) – *The Albano Maar Lake High resolution bathymetry and dissolved CO2 budget (Colli Albani District, Italy): costrains to hazard evaluation.* – J. Volcanol. Geotherm. Res. 171, 258-268

APAT (2007) – *Rapporto sulle frane in Italia* – Il Progetto IFFi, Metodologia, risultati e rapporti regionali. APAT, Rapporti 78/2007, Roma

APEL M. (2006) – *From 3d geomodeling system towards 3d geoscience information systems: Data model, query functionality, and data management.* – Computers & Geosciences 32, 222-229

ARECCO P. (1985) – *Caratteri geologico-stratigrafici dell'area settentrionale, compresa tra il GRA, la via Aurelia e la via Prenestina.* – Tesi di Laurea in Scienza Geologiche Università di Roma La Sapienza (inedito)

AUTODESK (2007) – Autodesk Map, Raster Design

ATZENI P., CERI S., PARABOSCHI S. & TORLONE R. (2006) – *Le basi di dati. Modelli e linguaggi di interrogazione, Seconda Edizione* – McGraw-Hill, Milano.

BARBERI F., BUONASORTE G., CIONI R., FIORDALISI A., FORESI L., IACCARINO S., LAURENZI M.A., SBRANA A., VERNIA L. & VILLA I.M. (1994) – *Plio-Pleistocen geological evolution of the geothermal area of Tuscany-Latium.* – Mem. Descr. Della Carta Geol. D'It. 49, 77-134

BARBERI F., CARAPEZZA M.L.., RANALDI M. & TARCHINI L. (2007) – *Gas blowout from shallow boreholes at Fiumicino (Rome): induced hazard and evidence of deep CO_2 degassing on the Tyrrenian margin of Central Italy* – J. of Vulc. And Geoth. Res. 165, n.1-2, 17-31

BARCHI M.R.., AMATO A., CIPPITELLI G., MERLINI S. & MONTONE P. (2007) – *Extensional tectonics and seismicity in the axial zone of the Southern Appennines.* – Boll Soc. Geol It. (Ital. J. Geosci.), Spec. Issue n. 7, 47-56

BARD & BOUCHON (1985) – *The two dimensional resonance of sediment-filled valleys*. – Bull. Seism. Soc. Am., 75, 519-541

BARTOLE R. (1995) – *The North Tyrrenian - Northern Appennines postcollisional system: costraints for a geodynamic model* – Terra Nova 7, 7-30

BASILI A., FAVALI P., SCALERA G. & SMRIGLIO G. (1987) – *Valutazione della pericolosità sismica in Italia centrale con particolare riguardo alla città di Roma* – ING, Roma

BELL F.G, CRIPPS J.C., CULSHAW M.G. & O'HARA M. (1987) - *Aspects of geology in planning.* - in: M.G. Culshaw, F.G. Bell, J.C. Cripps and M. O'Hara, Eds, *Planning and Engineering Geology, Geological Society,* Engineering Geology Special Publication 4, 1–38.

BENCIVENGA M., DI LORETO E. & LIPERI L (1995) – *Il regime idrologico del tevere, con particolare riguardo alle piene nella città di Roma* - A cura di Funiciello R. Mem. Descr. Carta Geol. It., 50, 125-172.

BENEO F., CENSINI G., PINO G., SERVA L., & ZECHINI A. (1996) - *Ottimizzazione di soluzioni operative nello scavo di gallerie metropolitane a piccola profondità e profonde attraverso la previsione geologica ed il calcolo: indagini geofisiche, in progetto strategico gallerie* – Unità Operativa Anpa-Novametro-Impregilo - problematiche geologiche ed ingegneristiche per la realizzazione delle gallerie di linea e di stazione dei nuovi tratti della metropolitana A di Roma e confronto con metodi alternativi, 61-77

BERNABINI M., (1965) - *Un esempio di applicazione dei metodi sismici allo studio del comportamento statico dei pilastri in sotterraneo* -Symposium A.M.S., Cagliari

BERNABINI M., ESU F., MARTINETTI S. & RIBACCHI R. (1966) – *On the stability of the pillars in an underground quarry worked through soft pyroclastic rocks*. – Symposium A:M:S:, Cagliari

BLANC A.C. (1942) - *Variazioni climatiche ed oscillazioni della linea di riva nel Mediterraneo centrale durante l'Era Glaciale*. - Geologie d. Meere u. Binnengewässer, 5, 137-219.

BLAKIE P., CANNON T., DAVIS I. & WISNER B.,. (1995) – *At Risk, Natural Hazards,People's Vulnerability and Disaster*. – Routledge, London, New York.

BONI C., BONO P. & CAPELLI G. (1988) – *Carta Idrogeologica Del Territorio Della Regione Lazio Alla Scala 1:250.000.* - Regione Lazio, Università Degli Studi Di Roma "La Sapienza".

BOSCHI E., CONTI C., DI BONA M., FUNICIELLO R., MALAGNINI L., MARRA F., MARTINES G., ROVELLI A. & SALVI S. (1993) – *Risonanza sei sedimenti del Tevere e danneggiamento dei monumenti nel centro storico di Roma: il caso della Colonna Antonina*. – in "Ricerche nel campo della Sismologia e Geodinamica negli anni 1990-1991", ING, Roma 357-370

BOZZANO F., FUNICIELLO R., MARRA F. ROVELLI A. & VALENTINI G. (1995) – *Il sottosuolo dell'area dell'Anfiteatro Flavio in Roma* – Geol. Appl. Idrogeol. 30, 320-324

BOZZANO F., FUNICIELLO R., GAETA M., MARRA F., ROSA C. & VALENTINI G.(1997) – *Recent alluvial deposits in Rome (Italy): morpho-stratigraphic, mineralogical and geomechanical characterization* – Poc. Int. Symp. Engineering Geology and the Environment, Publ. 1,1193-1198

BOZZANO F., GAETA M., TERRINONI M. (1998) - *Slope Stability Of Monte Mario Urban Park In Rome (Italy)*. - Proceedings Of The 8th International Association Engineering Geology Congress, Vancouver 3, 1601-1608

BOZZANO F., ANDREUCCI A., GAETA M. & SALUCCI R. (2000) – *A geological model of the buried Tiber River valley beneath the historical centre of Rome* – Bull. Eng. Geol. Env. 59, 1-21

BOZZANO F., CASERTA A., GOVONI A., MARRA F. & MARTINO S. (2008) - *Static and dynamic characterization of alluvial deposits in the Tiber River Valley: New data for assessing potential ground motion in the City of Rome* – J. Geophysical Res, 113, B01303, doi:10.1029/2006JB004873

BROCCHI G.B. (1820) – *Dello stato fisico del suolo di Roma ed illustrazione della carta geognostici di questa città* – Stamperia de Romanis, pagg 281.

BRANCALEONI R., CORAZZA A., GARBIN F., LEONE F., MORASCHINI C. & SCARAPAZZI M. (2003) – *Il rilievo di Monte Mario a Roma: sviluppo urbanistico e dissesti. Un caso di geologia urbana.* – Geologia dell'Ambiente, anno XI, n 3/2003, 2-14

BURGHIGNOLI A., DESORTIS A., LACARBONARA W., SOCCODATO F.M., VIGGIANI G.M.B. & VESTRONI F. (2003) – *Studio tecnico scientifico dei fenomeni di interazione tra le opere di linea e l'ambito monumentale sovrastante nella tratta San Giovanni-Piazza Venezia della Linea C della metropolitana di Roma.* -Convenzione di Ricerca tra STA e DISG, Rapporto conclusivo.

CADET J.P. & FUNICIELLO R. (Coordinators) (2004) – *Geodynamic Map of Mediterranean Sheet 1 and 2* - CGMW-ENS-INGV-ROMA3-UNESCO-Université Pierre et Marie Curie, Centre Impression of Commission for the Geological Map of the World, Limoges, France

CALABRESI G. (2004) - *Terreni Argillosi Consistenti: Esperienze Italiane*. - Rivista Italiana di Geotecnica, Anno XXXVIII, 1, Gennaio-Marzo, 14-57

CAMPOLUNGHI M.P., CECILI A., CAPELLI G., CONSIGLIO E. (2003) - *Impiego della cartografia storica GIS per la valutazione dei pericoli connessi ad un deposito alluvionale nella Città di Roma*, - 4° Forum Italiano di Scienze della Terra, FIST, GEOITALIA, Chieti

CAMPOLUNGHI M.P., MAGRI D., CAPELLI G:, BELLOTTI P., LANZINI M. (2004) - *Sedimentation dynamics in a holocene alluvial deposit in Rome, Italy*. - Atti 32° International Geological Congress, Firenze, Agosto, 20-28

CAMPOLUNGHI M.P., CAPELLI G., FUNICIELLO R. & LANZINI M. (2007) – *Geotechnical studies for foundation settlement in Holocenic alluvial deposits in the City of Rome (Italy)* – Engineering Geology 89, 9-35

CAMPOLUNGHI M.P., CAPELLI G., FUNICIELLO R. & LANZINI M. (2008) – *Processi di subsidenza nei depositi alluvionali olocenici nella città di Roma: caratteristiche stratigrafiche e geotecniche* - in La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia*.,* Mem. Descr. Della Carta Geologica d'Italia, Vol LXXX, APAT Servizio Geologico d'Italia, 65-82

CAMPOLUNGHI M.P., CAPELLI G., FUNICIELLO R., LANZINI M., MAZZA R. & CASACCHIA R. (2008) – *Un caso esemplare: la stabilità degli edifici nell'area intorno a Viale Giustiniano Imperatore (Roma, IX Municipio)* - in La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia*.,*

Mem. Descr. Della Carta Geologica d'Italia, Vol LXXX, APAT Servizio Geologico d'Italia, 195-219

CAPELLI G., FUNICIELLO R., IORIO D. & SALVATI R. (1999) – *Loss Of Groundwater Resources Following Major Quarrying Activity In Urban Areas: The Galeria – Magliana Quarry Basin (Rome, Italy)*. - Iahs Publication No. 259, Proceedings IUGG 99 Symposium Hs5, Birmingham, July 1999 "Impact Of Urban Growth On Surface Water And Groundwater Quality", Edited By Bryan Ellis, 169-175

CAPELLI G., MAZZA R., SALVATI R. & DE FILIPPIS L. (2001) – *Studi di geologia ambientale: caratterizzazione idrogeologica delle aree protette di RomaNatura in: Ricerche di base per i piani delle aree naturali protette di RomaNatura.* – Informatore Botanico Italiano, 33, suppl. 1, Maggio

CAPELLI G., SALVATI R., MAZZA R. & ZALAFFI M. (2002) – C*aratteristiche Idrogeologiche Del Delta Del Fiume Tevere E Monitoraggio Della Falda Superficiale Nell'area Di Castel Fusano*. - in: Il Recupero Ambientale Della Pineta Di Castel Fusano- Studi e Monitoraggi. A Cura Di BLASI C., CIGNINI B., DELLISANTI R.M., MONTAGNA P., Palombi Editori, 9-13

CAPELLI G. & MAZZA R. (2005) – *Schema idrogeologico della Città di Roma – Gestione idrica e del rischio idrogeologico*. – In: Atti del convegno "La IV Dimensione – Lo spazio sotterraneo di Roma" SIGEA Geologia dell'Ambiente, anno XIII n 4 (supplemento), Roma, 47-58

CAPELLI G. & MAZZA R. (2008) – *Intrusione salina nel delta del Fiume Tevere. Evoluzione del fenomeno nei primi anni del terzo millennio* - in La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia*.,* Mem. Descr. Della Carta Geologica d'Italia, Vol LXXX, APAT Servizio Geologico d'Italia, 237-260

CARAPEZZA M.L., BADALAMENTI B., CAVARRA L. & SCALZO A. (2003) – *Gas hazard assessment in a densely inhabited area of Colli Albani Volcano (Cava dei Selci, Roma)* – J. Volcanol. Geotherm. Res. 123, 81-94

CARAPEZZA M.L., BARBERI F., TARCHINI L., CAVARRA L. & GRANIERI D. (2004) – *Le emissioni gassose dell'area vulcanica dei Colli Albani* – Atti del Convegno Ecosistema Roma, Roma 14-16 Aprile 2004, Estratto, Acc. Naz. Lincei, Bardi Editore

CARAPEZZA M.L., GIORDANO G., TUCCIMEI P., ALBERTANO P., BARBERI F., CAVARRA L., CIONI R., ELWOOD N.T.W., FUNICIELLO R., GRANIERI D., GUIDI M., LELLI M., SCENNA A., TARCHINI L. & TEDESCHI M. (2005) – *Nuovi Dati Sull'Attività Recente Del Cratere Del Lago D'Albano E Sul Degassamento Dei Colli Albani.* – Atti Convegni Lincei, Acc. Lincei 218, 187-233

CARAPEZZA, M.L. & TARCHINI, L., (2007) - *Geochemical evidence of huge magmatic degassing from the quiescent Alban Hills volcano (Rome, Italy).* - J. Volcanol. Geotherm.Res., 165, 5-16, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2007.04.008.

CARBONI M.G. (1980) - *Contributi alla stratigrafia del sottosuolo della Campagna Romana: il sondaggio Malagrotta.* - Boll. Soc. Geol. It. **99**, 167-174.

CARTESIA (1999): *Banca dati della Cartografia vettoriale del comune di Roma, scala nominale 1:2000, aggiornata al 1999* – Ufficio Cartografico XII Dip.to, Comune di Roma

CAVINATO G.P., COSENTINO D., DE RITA D., FUNICIELLO R. & PAROTTO M. (1994) – *Tectonic-sedimentary evolution of intrappaninic basins and correlation with the volcano-tectonic activity in Central Italy* – Mem. Descr. Della Carta Geol. D'It. XLIX,63-76

CESI C., EULILLI V. & FERRI F. (2008)– *Analisi ed interpretazione dei valori delle anomalie di gravità del territorio dell'area romana: correlazione con gli elementi geologici di superficie e la struttura profonda* – in La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia, Mem. Descr. Della Carta Geologica d'Italia, Vol LXXX, APAT Servizio Geologico d'Italia, 97-113

CESTARI F. (2005) – Prove geotecniche in sito, Terza Edizione – Edizioni Geo-Graph, Segrate

CHANG Y.S. & PARK H.D. (2004) – *Development of a web-based Geographic Information System for the management of borehole and geological data* – Computers & Geosciences 30, 887-897.

CHEN P.P.S., (1976) – The *entity-relationship model: toward a unified view data* – ACM Transaction on Database Systems, 1, n 1

CIFELLI F., DONATI S. & FUNICIELLO F (1999) – *Distribution of Effects in the Urban Area of Rome Durino the October 14, 1997 Umbria Marche Earthquake* – Phys. Chem. Earth (A), 24, n 6 483-487

CIFELLI F., DONATI S., FUNICIELLO F & TERTULLIANI A. (1999a) – *High-Density macroseismic survey in urban areas. Part 1: proposal for methodology and its application to the city of Rome*. – Annali di Geofisica, 42(1), 99-114

CIFELLI F., DONATI S. & FUNICIELLO F (1999b) – *Distribution of Effects in the Urban Area of Rome, for the October 14, 1997 (Central Italy) Event.* – Physics and Chemistry of the Earth, 24 (6), 483-488

CIFELLI F., DONATI S., FUNICIELLO F & TERTULLIANI A. (2000) – *High-Density macroseismic survey in urban areas. Part 2: results for the city of Rome.* – Bull. Seism. Soc. Am., 90(2), 298-311

CONATO V., ESU D., MALATESTA A., & ZARLENGA F., (1980) – *New data on the Pleistocene of Rome*. – Quaternaria, 22, 131-176

CONGIU G. (2006) – Autodesk Map 3D. Dal CAD al GIS tridimensionale – GC Edizioni

CORAZZA A. & LOMBARDI L. (1995) – *Idrogeologia dell'area del Centro Storico di Roma* .- In: "La Geologia Di Roma. Il Centro Storico". A cura di Funiciello R. Mem. Descr. Carta Geol. It., 50, 177-211 .

CORAZZA A., LOMBARDI L. & MARRA F. (1995) – *Geologia, idrogeologia e approvvigionamento idrico del Colle Capitolino (Roma, Italia)* – Il Quaternario It. J. Of Quaternary Sc. 17 (2/2), 413-441

CORAZZA A. & MARRA F. (1995) - *Carta degli spessori dei terreni di riporto, in scala 1:10000.* In, La Geologia del Centro storico. - A cura di Funiciello R. Mem. Descr. Carta Geol. It., 50.

CORAZZA A., LANZINI M., ROSA C., SALUCCI R., (1999) - *Caratteri stratigrafici, idrogeologici e geotecnici delle alluvioni tiberine nel settore del Centro Storico di Roma*. Il Quaternario, 12(2), 215-235

CORAZZA A., LEONE F. & MAZZA R. (2002) - *Il quartiere di Monteverde a Roma: sviluppo urbanistico e dissesti in un'area urbana*. - Geologia dell'Ambiente, periodico SIGEA anno X, n. 1, pag. 8-18

CORAZZA A., MAZZA R., BERTUCCIOLI P. & PUTRINO P . (2002) – *Il Progetto "Cavità" - Analisi Del Rischio Dovuto Alla Presenza Di Cavità Sotterranee*. - Atti Dei Convegni Dei Lincei "Il Dissesto Idrogeologico: Inventario E Prospettive" (5 Giugno 2001 – Roma) . Accademia Nazionale Dei Lincei 181, Pp. 355-363.

CORAZZA A. - (2004) – *Il rischio di fenomeni di sprofondamento un Italia: le attività del Dipartimento della protezione Civile* . Atti del Convegno "Stato dell'arte sillo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle Amministrazioni Statali e locali nel governo del territorio", APAT, Roma 20-21 Maggio 2004, 319-330

CORAZZA A., LOMBARDI L., LEONE F., BRANCALEONI R. & LANZINI M., (2004) - *Le acque sotterranee nei terreni di riporto della città di Roma.* - Atti Dei Convegni Dei Lincei "Ecosistema Roma", 14-16 Aprile 2004, Accademia Nazionale Dei Lincei , Roma.

CORAZZA A., GIORDANO G., DE RITA D., (2006) - *Hydrogeology of the city of Rome . In: Tuffs—Their properties, uses, hydrology, and resources*. A cura di Heiken G . Geol . Soc . Am. Special Paper 408, 113–118, doi: 10.1130/2006.24.08(4.2).

CORNELL (1968) – *Engineering Seismic Risk Analysis* – Bull. Seism. Soc. Am. 86, 58, 1583-1606

COSENTINO D., CIPOLLARI P., DI BELLA L., ESPOSITO A., FARANDA C., GIORDANO G., GLIOZZI E., MAZZINI I., MORETTI S. & FUNICIELLO R. (2004) - *Il limite Pliocene/Pleistocene nell'area della città di Roma: nuovi dati di sottosuolo dal Giovanni XXIII (Monti della Farnesina).* - Riassunti Riunione GEOSED, Roma

COSENTINO D., FEDERICI L., CIPOLLARI P. & GLIOZZI E., (2006) – *Environments and tectonic instability in central Italy (Garigliano Basin) during the late Messinian Lago-Mare episodi: new data from the onshore Mondragone 1 well.*- Sedimentary Geology, 188-189, 297-317

COSENTINO D., CIPOLLARI P., DI BELLA L., ESPOSITO A., FARANDA C., FUNICIELLO R., GIORDANO G., GLIOZZI E., MATTEI M., MAZZINI I. & PORRECA M. (2008) – *Geologia dei Monti della Farnesina (Roma): Nuovi dati di sottosuolo dalla galleria Giovanni XXIII.* – in La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia*.,* Mem. Descr. Della Carta Geologica d'Italia, Vol LXXX, APAT Servizio Geologico d'Italia, 285-313

CRESCENZI R., PIRO M. & VALLESI R. (1995) – LE CAVITÀ SOTTERRANEE A ROMA - In, La Geologia del Centro storico. - A cura di Funiciello R. Mem. Descr. Carta Geol. It., 50, 249-278.

D'ADOSTINO N. & SELVAGGI G. (2004) – *Crustal motion along the Eurasia-Nubia plate boundary in the Calabrian Arc and Sicily and active extension in the Messina Straits from GPS measuraments.* - J. of Geophisical Res., 109, B11402, doi:10.1029/2004JB002998

DAI F.C,. LIU Y & WANG S. (1994) - *Urban geology: a case study of Tongchuan City, Shaanxi Province, China.* - Engineering Geology 38 **(**1994), 165–175

DAI F.C., LEE C.F. & ZHANG X.H. (2001) - *GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: a case study. Engineering Geology* **61** (2001), pp. 257–271.

DE ANGELIS D'OSSAT G., (1905) - *I veli acquiferi di Monteverde, presso Roma*. - Boll. Soc. Ing. Arch., 14, Roma

DE ANGELIS D'OSSAT G., (1915) - *Relazione di perizia geoidrologica sul disastro del Tritone* del 3/1/1913, in Roma.

DE ANGELIS D'OSSAT G. (1932) - *La geologia e le Catacombe Romane sulla V. Flaminia*. - Mem. P. Acc. Sc. Nuovi Lincei 16, Roma.

DE ANGELIS D'OSSAT G. (1932) - *La geologia e le catacombe romane in Via Salaria Nuova* . Mem. P. 135 Acc. Sc. Nuovi Lincei, 85, Roma 1932

DE ANGELIS D'OSSAT G. (1933-1935) - *La geologia e le catacombe romane. Catacombe sulle vie Cornelia e Aurelia*. - Mem. P. Acc. Sc. Nuovi Lincei, 17, Roma 1933-1935

DE ANGELIS D'OSSAT G. (1937) - *La geologia e le catacombe romane. Catacombe sulle vie Portuense e Ostiense*. - Mem. P. Acc. Sc. Nuovi Lincei, Roma 1937

DE ANGELIS D'OSSAT G. (1940) - *La stabilità delle cave e cavità sotterranee*. - Materie Prime d'Italia e dell'Impero, 5, pag. 101-112

DE ANGELIS D'OSSAT G. (1940) - *Le catacombe maggiori della Via Ardeatina e Appia*. - Riv. L'Urbe, 5, Roma, 1940

DE ANGELIS D'OSSAT G (1940) – *La sella tra Campidoglio e Quirinale* – Capitolium 21, 17-23

DE ANGELIS D'OSSAT G (1942) – *Nuove sezioni geologiche dei Colli di Roma* – Boll. Soc. Geol. It. 61, 22-48

DE ANGELIS D'OSSAT G (1943) – *Campidoglio, genesi del Colle* – Capitolium 18, 69-74

DE ANGELIS D'OSSAT G. (1945-1946) - *Studi di Geologia Applicata alle catacombe romane* . - Boll. Soc. Geol. It., 70, Roma 1945-1946

DE ANGELIS D'OSSAT G., (1948) - *Osservazioni di geologia Applicata sugli scavi alla Stazione Termini di Roma*. - Ingegneria Ferroviaria, III, 7-8, 443-450

DE BENEDETTI A., FUNICIELLO R., GIORDANO G., E CAPRILLI , G. DIANO, M. PATERNE, (2008) - *Volcanology history and legends of the Albano maar*. - In: Volcanoes and Human History. A cura di Cashman K. and G. Giordano. J. Volcanol. Geotherm. Res., Spec. Vol. DOI:10.1016/j. j. Vol. geores. 2008.01.035

DECKER R.W. & DECKER B. (1989) – *Volcanoes* - New York, NY (USA); W. H. Freeman and Company

DE MULDER E.F.J. (1996) – *Urban Geoscience* – McCall G.J.H., E.F.J. De Mulder, B.R. Marker Eds, 1-11

DE RITA D., BERTAGNINI A., CARBONI M.F., CICCACCI S., DI FILIPPO M., FACCENNA C., FREDI P., FUNICIELLO R., LANDI P., SCIACCA P., VANNUCCI N., ZARLENGA F . (1994) - *Geological petrological evolution of the Ceriti Mountains area (Latium Italy)*. - Mem. Descr. Carta Geol. It., 49, 291-232.

DE RITA D., DI FILIPPO M.., ROSA C. (1996) – *Structural evolution of the Bracciano volcano-tectonic depression, Sabatini volcanic complex, Italy*. - In: Volcano Instability on the Earth and Other Planets. A cura di Mc Guire WJ, Jones AP & Neuberg. Geol. Soc. London, Spec. Publ., 110, 225-236 .

DE RITA D., FABBRI M., GIORDANO G. & RODANI S. (2000) - *Proposta di organizzazione della stratigrafia delle aree vulcaniche secondo i principi delle unità stratigrafiche a limiti inconformi e sua informatizzazione*. - Boll. Soc. Geol. It., 119, 749-760.

DE RITA, D., FACCENNA, C., FUNICIELLO, R., ROSA. C. (1995) - *Stratigraphy and volcano-tectonics . In: The Volcano of the Alban Hills*. - A cura di Trigila R. Tipografia SGS Roma, 33-71.

DE RITA D., FUNICIELLO R., CORDA L., SPOSATO A., ROSSI U. (1993) – *Volcanic Units. In: Sabatini volcanic complex*. - A cura di Di Filippo m. CNR, Quaderni de La Ricerca Scientifica, 11 Progetto Finalizzato Geodinamica .

DE RITA D., FUNICIELLO R. & PAROTTO M. (1988) - *Carta geologica del Complesso vulcanico dei Colli Albani* . CNR - Roma .

DE RITA D., FUNICIELLO R., ROSA C. (1988b) – *Caratteristiche deposizionali della II colata piroclastica del Tuscolano-Artemisio (Complesso vulcanico dei Colli Albani, Roma)*. - Boll. GNV., 4, 278-297.

DE RITA D., FUNICIELLO R., ROSA C. (1992) – *Volcanic activity and drainage network evolution of the Alban Hills area (Rome, Italy)*. - Acta Vulcanol., Marinelli volume 2, 185-198.

DE RITA D., GIORDANO G., ESPOSITO A., FABBRI M., RODANI S. (2002) - *Large volume, Middle Pleistocene, phreatomagmatic ignimbrites from the Colli Albani Volcano: stratigraphy, eruptive history and structural control.* - J. Volcanol. Geotherm. Res.,118, 77-98.

DE RITA D., G. GIORDANO, A. ESPOSITO, M. FABBRI, & S. RODANI (2006) – *Reply to Karner et al. Comment on: Large volume phreatomagmatic ignimbrites from the Colli Albani volcano (Middle Pleistocene, Italy), by D. De Rita, G. Giordano, A. Esposito, M. Fabbri, and S. Rodani (JVGR (2002) 118)* – J. Volc. Geoth. Res. 158, Issue: 3-4, November 15, 493-495

DESIDERATI S. (2005) – *Dati interferometrici satellitari e condizioni di stabilità nell'area romana* - Tesi di Laurea in Scienza Geologiche Università di Roma 3 (inedito)

DI FILIPPO M & TORO B. (1980) – *Analisi gravimetrica delle strutture del Lazio Meridionale* – Geologica Romana, 19, 285-294

D'INDECCO A. (1985) – *Caratteri geologico-stratigrafici dell'area meridionale, compresa tra il GRA, la via Aurelia e la via Prenestina.* - Tesi di Laurea in Scienza Geologiche Università di Roma La Sapienza (inedito)

DONATI S., FUNICIELLO R. & ROVELLI A. (1999) – *Seismic response of historical centre of Rome* – Mem. Descr. Della Carta Geol. D'Italia, Vol LIV, Servizio Geologico Nazionale, 229-239.

DONATI S. (2000) – *Metodologie per lo studio della risposta simica in aree urbane* – Tesi di Dottorato di Ricerca in Geodinamica Dip.to Sc. Geologiche, Università di Roma Tre

DONATI S., CIFELLI F. & FUNICIELLO F., (2008) – *Indagini macrosismiche ad alta densità per lo studio del risentimento sismico nella città di Roma* – in La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia*.,* Mem. Descr. Della Carta Geologica d'Italia, Vol LXXX, APAT Servizio Geologico d'Italia, 13-30

EDBROOKE S.W., MAZENGARB C. & STEPHENSON W. (2003) – *Geology and geological hazard of the Auckland urban area, New Zeland* - Quaternary International 103, 3-21

EPC (2008) - *Piano Generale di emergenza di Protezione Civile – Scenari di rischio predefiniti e Procedure per l'attivazione e l'intervento dell'ufficio Extradipartimentale della Protezione Civile di Roma e delle Strutture Operative Comunali e di Supporto* – delibera comunale n 19/2008, applicazione della Deliberazione G.C. 1099/99 e OPCM 3606 del 28/08/07" .

ESRI (1995) – Understanding GIS, the ARC/INFO Method – Environmental System Research Institute, Inc, ESRI PRESS

ESRI (1995)– UML language –Corso ESRI per il Politecnico Federale di Zurigo (ETHZ)

ESRI (2006)– ArcGis™ suite, release 9.2

FACCENNA C., FUNICIELLO R. & MARRA F. (1995) – *Caratteri strutturali dell'area romana* – in *La geologia di Roma. Il Centro storico*. –Mem. Descr. Della Carta Geol. D'Italia, Vol L,

FACCENNA C., MATTEI M., FUNICIELLO R. & JOLIVET L. (1997) – *Styles of back-arc extension in Central Mediterrean*. – Terra Nova 9, 126-130, Blackwell, Oxford

FAH D., IODICE C., SUHADOLC P. & PANZA G.F. (1993) – *A new method for the realistic estimation of strong ground motion in megacieties: the case of Rome.* – Earthquake Spectra, 9(4), 643-668

FAH D., IODICE C., SUHADOLC P. & PANZA G.F. (1995) – Application of numerical simulations for a tentative seismic microzonation of the city of Rome – Annali di Geofisica, 38(5-6), 607-616

FEDERICO F. & SCREPANTI S. (2002) - *Analisi della stabilità di cavità sotterranee in rocce piroclastiche del sottosuolo di Roma*. - Atti del XXI Conv. Naz. Geotecn., AGI, L'Aquila, 529-536

FORNASERI M., SCHERILLO A. & VENTRIGLIA U. (1963) - *La regione vulcanica dei Colli Albani*. - VulcanoLaziale., CNR - Roma., pp.560

FORTE M. (2002) – *I Sistemi Informativi Geografici in Archeologia*. – MondoGis, Roma

FOSSA MANCINI E. (1922) – *Un nuovo quartiere di Roma (Monteverde) e le frane* – Giornale di Geologia Pratica, 17, Pisa, 54-66

FRUTAZ A.P. (1962) – *Le piante di Roma* – Istituto di Studi Romani

FUNICIELLO R. & PAROTTO M. (1978) – *Il substrato sedimentario nell'area dei Colli Albani: considerazioni geodinamiche e paleogeografiche sul margine tirrenico dell'Appennino Centrale.* – Geologica Romana 17, 238-287.

FUNICIELLO R., GASPARINI C., MONTONE P., PAROTTO M. & SALVINI F. (1987) - *Il campo di fatturazione superficiale dei Colli Albani (Roma): implicazioni per un modello sismotettonico dell'arca*. - Boll. G.N.V. 1987, 373-384.

FUNICIELLO R. (1995) A cura di – *La geologia di Roma. Il Centro storico*. –Mem. Descr. Della Carta Geol. D'Italia, Vol L, Servizio Geologico d'Italia, IPZS

FUNICIELLO R., BOSCHI E., CASERTA A., DONATI S., MARRA F. & ROVELLI A. (1998) – *Distribution of seismic damage to monuments in Roma: an interpretation in terms of source and site effect.* – Riassunti del "1st Int. Congress on Science and Technology for the safeguard of cultural heritage in the Mediterranean Basin", 27 Nov.-2 Dec. 1995, Catania, Siracusa – Italia. Vol. I, 417-420

FUNICIELLO R., GIORDANO G., DE RITA D., CARAPEZZA M.L. & BARBERI F. (2002) – *L'attività recente del cratere del lago albano di Castelgandolfo.* – Rend. Lincei, Sc. Fis. Nat., 13, 113-143

FUNICIELLO R., GIORDANO G., DE RITA D., (2003) - *The Albano maar lake (Colli Albani Volcano, Italy): recent activity and evidence of pre-Roman Age catastrophic lahar events*. - J. Volcanol. Geotherm. Res., 123, 43-61.

FUNICIELLO R., GIORDANO G., ADANTI B., GIAMPAOLO C. (2004) - *The Seven Hills: constitution, visible, traces and geologic evidence: itinerary, profiles and observation points for the shape of the city of Roma and its history.* - Field Guidebook to excursion D05, 32nd International GeologicalCongress, Firenze 2004.

FUNICIELLO R., CAMPOLUNGHI M. P., TESTA O., PAROTTO M., LANZINI M., CECILI A., (2005) - *La strutturam geologica dell'area romana ed il Tevere*. - Rend. Acc. Naz. Dei Lincei, 128-184.

FUNICIELLO R. & GIORDANO G. (2005) – *Carta geologica del comune di Roma* – Vol I, Comune di Roma Protezione Civile –APAT-DSG UniRoma3.

FUNICIELLO R. & COLOGGI P. (2008) – *I fattori di pericolosità e lo sviluppo urbano* – in La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia*.,* Mem. Descr. Della Carta Geologica d'Italia, Vol LXXX, APAT Servizio Geologico d'Italia, 7-12

FUNICIELLO R. & GIORDANO G. (2008) – *La nuova carta geologica di Roma: litostratigrafia e organizzazione stratigrafica* – in La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia*.,* Mem. Descr. Della Carta Geologica d'Italia, Vol LXXX, APAT Servizio Geologico d'Italia, 39-86

FUNICIELLO R. & GIORDANO G. (2008) – *Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia* - Servizio Geologico Nazionale

FUNICIELLO R. & TESTA O. (2008) – *Cambiamenti morfologici e sviluppo urbano nella città di Roma: il versante destro del Tevere* – in La geologia di Roma. Dal centro storico alla

periferia., Mem. Descr. Della Carta Geologica d'Italia, Vol LXXX, APAT Servizio Geologico d'Italia, 261-274

GIORDANO G., ESPOSITO A., DE RITA D., FABBRI M., MAZZINI I., TRIGARI A., ROSA C., FUNICIELLO R. (2002b) - *The sedimentation along the Roman coast between Middle and Upper Pleistocene: the interplay of eustatism, tectonics and volcanism – new data and review.* - It. J. Quat. Sc., spec. Vol INQUA, 16(1bis)

GIORDANO G., MAZZA R., CAPELLI G., FUNICIELLO R. & PAROTTO M. (2004) – *Geology Of Metropolitan Areas. Geology, Hydrogeology, Geotechnics and Seismic Behaviour of the Southern Suburbs of the City of Roma: Ostiense*. - In: Mapping Geology in Italy, A cura di PASQUARÉ G. & VENTURINI C.,APAT, Selca, Roma, 113-122

GIORDANO G., SCENNA A., FUNICIELLO R. (2005) - *Analisi vulcanologico-stratigrafica della Successione del Tavolato*. - Rend. Acc. Lincei, 187-203

GIORDANO G., DE BENEDETTI A.A., DIANA A., DIANO G., GAUDIOSO F., MARASCO F., MICELI M., MOLLO S., CAS R.A.F. & FUNICIELLO R. (2006) – *The Colli Albani caldera (Roma, Italy): stratigraphy, structure and petrology.* – in RAF Cas & Giordano G. (eds), Explosive Mafic Volcanism, J. Volcanol. Geotherm. Res., Spec. Vol 155

GIORDANO G. (2008) – *I vulcani di Roma: storia eruttiva e pericolosità* – in La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia, Mem. Descr. Della Carta Geologica d'Italia, Vol LXXX, APAT Servizio Geologico d'Italia, 87-95

GELFOND I.M., GUBERMAN S.A., IZVEKOVA M.L., KEILLIS-BOROK V.I. & LA. RANZMAN E. (1972) - *Criteria of high seismicity determined by pattern recognition.* - in: R.A. Ritsma, Ed., *The Upper Mantle*, Tectonophysics 13, 415–422

GONG J., CHENG P. & WANG Y. (2004) – *Three-dimensional modelling and application in geological exploration engineering* – Computers & Geosciences 30, 391-404

GLASSEY P., BARRELL D., FORSYTH J., MACLEOD R. (2003) – *The geology of Dunedin, New Zealand, and the management of geological hazards* – Quaternary Int. 103,23-40

HAKE (1987) - *A review of engineering geological and geotechnical aspects of town and country planning with particular reference to minerals and the extractive processes* - Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 4; 69-74; DOI: 10.1144/GSL.ENG.1987.004.01.06

HIROSAWA, M., SUGANO, S. & KAMINOSONO, T. (1992) - *Seismic evaluation method and restoration technique for existing and damaged buildings developed in Japan.* - in: Okamoto, S., Okamoto, S. Eds., IDNDR Proceeding Tsukuba, Japan, 373–397

HOWLAND, A.F. (1992) - *Use of Computers in the Engineering Geology of the Urban Renewal of London's Docklands* - Quarterly Journal of Engineering Geology 25(4), 257-267

HOWLAND, A.F. (2001) - *The history of the development of procedures for the rapid assessment of environmental conditions to aid the urban regeneration process at London Docklands* - Engineering Geology, 60, 1-4, 117-125

HUTCHINSON M.F. (1988) - *Calculation of hydrologically sound digital elevation models* - Proceedings of the Third International Symposium on Spatial Data Handling, 17-19 August, Sydney. International Geography Union: Columbus, OH, 117-133

HUTCHINSON M.F., DOWLING T.I. (1991). - *A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia*. - Hydrological Processes 5: 45-58

HUTCHINSON M.F. (1993) - *On thin plate splines and kriging.* - in :*Computing Science and Statistics, Vol. 25*. Edited by M.E.Tarter and M.D.Lock, pp. 55-62. Berkeley: Interface Foundation of North America.

IGM (107-1924)– *Piano Topografico di Roma e suburbio, scala 1:5000* - Roma

IGM (2006) – *GESTOR '06: Sistema Informativo Geografico per i XX Giochi Olimpici Invernali, Torino 2006.* – a cura di Colella C., Firenze 2006.

IGM (2005)- *Verto 3* – Servizio Geodetico dell'Istituto Geografico Militare

ISSMFE-TC4 (1999) – *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards.* – The Japanase Soc. Soil Mech. And Found. Engineering, pp 14

ISTAT (2008) – *Popolazione residente: Anno 2008* – Demo-geodemo, http://demo.istat.it

JIMÈNEZ M.J., GARCÌA-FERNÀNDEZ M., ZONNO G. & CELLA F. (2000) – *Mapping soil effects in Barcellona, through an integrated GIS environment* – Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19, n. 4, 289-301

JOLIVET L., FACCENNA C., GOFFÈ B., MATTEI M., ROSSETTI F., BRUNET C., STORTI F., FUNICIELLO R., CADET J.P., D'AGOSTINO N. & PARRA T. (1998) – *Midcrustal shear zones in postorogenic extension: the northern Tyrrenian Sea case.* – J. Geophisical Res. 103, B6, 12111-12586. AGU Washington, USA

KAUFMANN O. & MARTIN T. (2008) – *3D geological modelling from boreholes, cross section and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines.* – Computers & Geosciences 34, 278-290

KETI LELO (2000) – *GIS e storia urbana* _ in Roma Ricerca e Formazione, Il GIS dell'Atlante storico ambientale di Roma tra XVII e XX secolo, 192-201.

KISHOR P., SCHUT P., SMEDSMO J. (2004) – *HOWTO for Getting Started with MapServer* – UMN, University of Minnesota

KARNER D.B., MARRA, F., RENNE, P.R. (2001) - *The history of the Monti Sabatini and Alban Hills volcanoes: groundwork for assessing volcanic-tectonic hazards for Rome*. - J. Volcanol. Geotherm. Res. 107, 185-219

KAPPOS A.J., STYLIANIDIS K.C. & PITILAKIS K. (1998) - *Development of Seismic Risk Scenarios Based on a Hybrid Method of Vulnerability Assessment* – Natural Hazard, 17, 2/March, 177-192, DOI 10.1023/A:1008083021022

KOUKIS G., SABATAKAKIS N., TSIAMBAOS G. & KATRIVESIS N. (2005) – *Engineering geological approach to the evaluation of seismic risk in metropolitan regions: case study of Patras, Greece*. – Bull. Eng. Geol. Environ 64, 219-235, DOI 10.1007/s 10054-005-0273-x

LANZINI M. (1995) – *Il problema delle cavità sotterranee a Roma (un rischio geologico)* – SIGEA, Geologia dell'Ambiente, 3, Luglio-Settembre.

LANZO G. & SILVESTRI (1999) – *Risposta sismica locale* – Helvelius Edizioni

LAXTON J.L. & BECKEN K. (1996) – *The design and implementation of a spatial database for the production of geological maps* – Computers & Geoscienses 22, n. 7, 723-733

LEGGET R.F (1987) -, *The value of geology in planning.* - in: M.G. Culshaw, F.G. Bell, J.C. Cripps and M. O'Hara, Eds, *Planning and Engineering Geology, Geological Society,* Engineering Geology Special Publication 4**,** 53–58

LEMBO FAZIO A., RIBACCHI R. (1990) - *Problemi di stabilità di scarpate e cavità sotterranee in rocce piroclastiche*. - Politecnico di Torino, MIR, 11, 1-13

LEONE I. (1986) - *Problemi connessi al consolidamento di una pendice del colle del Gianicolo in Roma interessata dai moti franosi*. - Atti XVI Conv. Naz. Geotecn., Bologna, 101-109

LEVERINGTON D.W., TELLER J.T. & MANN J.D. (2002) – *A GIS method for reconstruction of late Quaternary landscapes from isobase data and modern topography* – Computers and Geosciences 28, 631-639

LONGEY P.A., GOODCHILD M.F., MAGUIRE D.J. & RHIND D.W. (2006) – Geographic Information System and Science, Second Edition – ESRI PRESS, Wiley & Sons Ltd

MAGNI D. (2005) – *Introduzione a MapServer* – Dispense del Politecnico di Milano, Laboratorio di Geomatica.

MAGNI D. (2005) – *Esercitazioni con MapServer* – Dispense del Politecnico di Milano, Laboratorio di Geomatica.

MALKAWI I.A. ET ALII (1999) – *Effects of organics matter on the physical and the physochemical properties of an illitic soil* – Applied Clay Sc., 14, 257-278

MANCINI R. (2002) – *Le Mura Aureliane di Roma, atlante di un palinsesto murario* – Quasar Ed. Roma

MANCUSO (1996) – *Misure dinamiche in sito*. – Argomenti di Ing. Geotecnica, 4, Helvelius ed.

MANFREDINI M. (1990) - *Idrografia pleistocenica della bassa valle del Fiume Tevere (Italia Centrale)*. - Il Quaternario, 3, 39-59

MARRA F. & ROSA C. (1995) – *Stratigrafia ed assetto geologico dell'area romana*. – In: La Geologia di Roma, Mem. Descr. Carta Geol. D'Italia, L, 50-118

MARRA F., CARBONI M.G., DIBELLA L., FACCENNA C., FUNICIELLO R. & ROSA C. (1995) – *Il substrato plio-pleistocenico nell'area romana*. – Bollettino della Società Geologica Italiana, 114, 195-214

MARRA F.., FREDA C., SCARLATO P., TADDEUCCI J., KARNER D.B., RENNE P.R., GAETA M., PALLADINO D.M., TRIGILA R., CAVARRETTA G. (2003) - *Post–caldera activity in the Alban Hills volcanic district (Italy): $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology and insights into magma evolution*. - Bull.Volcanol. 65, 227-247.

MARTINO S., BOZZANO F., CASERTA A. & MARRA F. (2004) - *Il sito sperimentale di Valco S. Paolo (Roma): caratterizzazione geotecnica statica e dinamica dei depositi alluvionali del Tevere* - Convegno GNGTS, Ottobre 2004, CNR, Roma

MATTEI M., PETROCELLI V., LACAVA D. & SCHIATTARELLA M. (2004) – *Geodynamic implications of Pleistocene ultra-rapid vertical-axis rotation in the Southern Appennine (Italy)* – Geology 32, n. 9, 789-792, doi: 10.1130/G20552.1.

MATTEI M., FUNICIELLO R. & PAROTTO M. (2008) – *Roma e contesto geodinamico recente dell'Italia Centrale*. – in La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia*.,* Mem. Descr. Della Carta Geologica d'Italia, Vol LXXX, APAT Servizio Geologico d'Italia, 13-38

MAZZA R., PAGANELLI D., CAMPOLUNGHI M.P., CAPELLI G., LANZINI M., SERENI M. & DE FILIPPIS L. (2001) – *Rischio di crollo da cavità sotterranee nel settore orientale della città di Roma* – Atti del III Forum It. Si Sc. Della Terra, GEOITALIA 2001, Chieti, 5-8 Sett., 414-416

MAZZA R., CAPELLI G. & LANZINI M. (2008) - *Rischio di crollo di cavità nel territorio del VI municipio del comune di Roma.* - in La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia*.,* Mem. Descr. Della Carta Geologica d'Italia, Vol LXXX, APAT Servizio Geologico d'Italia, 149-170

MC HARG I. (1969) – *Design with Nature* – Natural History Press for the Am. Museum of Nat.-History, Doubleday, Garden City, New York

MCMILLAN A.A. & POWELL J.H. (1999) - *BGS Rock Classification Sheme, Volume 4: Classification of artificial (man-made) ground and natural superficial deposits —applications to geological map and datasets in the UK.* - British Geological Survey Research Report, RR

99-04. © NERC Copyright 1999 British Geological Survey, Nottingham, *Contributors*: Evans, C.D.R., Irving, A.A.M., Merritt, J.W., Morigi, A.N., Northmore, K.J.

MERONI F. & ZONNO G. (2000) – *Seismic risk* – Surveys in Geophisics 21, n. 2, 257-267

METRO C SPA (1995-2001) - Relazioni e documentazione inedita

MILLI S. (1987) – *Depositional setting and high-frequency sequence stratigraphy of the middle-upper Pleistocene to Holocene deposits of the Roman Basins.* – Geologica Romana, 33, 99-136

MOGI K. (1963) – *Some discussions of aftershoks, foreshoks and earthquakes swarms. The Fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena.* – Bull. Earth. Res. Inst., 41, 615-658

MOLIN D., AMBROSINI S., CASTANETTO S., DI LORETO E., LIPERI L. & PACIELLO A. (1986) – *Aspetti della sismicità storica di Roma* – Mem. Soc. Geol. It. 35, 8ff, 349-444

MOLIN D. & GUIDOBONI E. (1989) – *Effetto fonti, Effetto Monumenti a Roma: i terremoti dall'antichità ad oggi* – da "I terremoti prima del 1000 in Italia e nell'Area Mediterranea, ING, 194-223

MOLIN D. CASTANETTO S., DI LORETO E., GUIDOBONI E., LIPERI L., NARCISI B., PACIELLO A., RIGUZZI F., ROSSI A. TERTULLIANI A. & TRAINA G. (1995) – *Sismicità di Roma* - A cura di Funiciello R. Mem. Descr. Carta Geol. It., 50, 331-408.

MOZCO P., ROVELLI A., LABAK P. & MALAGNINI L. (1995) – *Seismic response of the geologic structure underlying the Roman Colosseum and a 2D resonance of a sediment valley.* – Annali di Geofisica 38, 5-6, 939-956

NATHANNAIL C.P. & ROSENBAUM M.S. (1998) – *Methods Paper, Spatial management of geotechnical data for site selection* – Engineering Geology 50, 347-356

NATH S.K. (2005) - *An Initial Model of Seismic Microzonation of Sikkim Himalaya through thematic mapping and GIS Integration of Geological and Strong Motion Features* - J. Asian Earth Sc. 25, 329–343.

NATH S K, VYAS M, PAL I & SENGUPTA P (2005) - *A Hazard Scenario in the Sikkim Himalaya from Seismotectonics Spectral Amplification Source Parameterization and Spectral Attenuation Laws using Strong Motion Seismometry*. - J. Geophys. Res. 110 B01301doi;10.1029/2004/2004JB003199

NOLLI G. B. (1748) – *Nuova Pianta di Roma* - Roma

OPCM N 3274 (20.03.2003*) - "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in*

zona sismica" - pubblicato nel Supplemento Ordinario n. 72 della G.U. n. 105 del 8.05.2003, con documenti allegati

OPCM N 3519 (28.04.2006) – *"Criteri generali per l'identificazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone"*- pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 118 del 11.05.2006, con documenti allegati

PAROTTO M & PRATURLON A. (1975) – *Geological summary of the Central Appenines* – Quaderni Ricerca Scientifica 90, 257-311, CNR

PAROTTO M. (2008) – *Evoluzione paleogeografia dell'area romana: una breve sintesi* – in La geologia di Roma. Dal centro storico alla periferia*.,* Mem. Descr. Della Carta Geologica d'Italia, Vol LXXX, APAT Servizio Geologico d'Italia

PARRAXIAUX A., TACHER L. & JOLIQUIN P. (2004) – *The hidden side of cities – towards three-dimensional land planning* – Energy and Buildings 35, 335-341

PATACCA E. & SCANDONE P. (1989) – *Post-Tortonian mountain building in the Appennines. The role of the passive sinking of a relic lithospheric slab*. – in: The lithosphere in Italy, Eds. Boriani A,. Bonafede M, Piccardo G.B. & Vai G.B., 157-176, Accademia dei Lincei, Roma

PONZI G. (1872) - *Del bacino di Roma e sua natura*. - Regia Tipografia, 51 pp., 1 carta geologica.

RICE A. (2000) - *Rollover in volcanic crater lakes: a possible cause for Lake Nyos type disasters* – J. Volcan. Geoth. Res. 97, 233-239

ROSENBAUM M.S., MCMILLAN A.A., POWELL J.H., COOPER A.H., CULSHAW M.G. & NORTHMORE K.J. (2003) – *Classification of artificial (man-made) ground* – Engineering Geology 69, 399-409

ROVELLI A., CASERTA A., MALAGNINI L. & MARRA F. (1994) – *Assessment of potential strong motion in the city of Rome.* – Annali di Geofisica, 37, 6, 1745-1769

ROVELLI A., MALAGNINI L. CASERTA A., & MARRA F. (1995a) – *Using 1D and 2D modelling of round motion for seismic zonazion criteria: results for the city of Rome.* – Annali di Geofisica, 38, 6, 591-606

SACERDOTI S. (2000) – *Guida all'uso di MapServer (versione 3.3)* – inedito Progetto d'esame inedito del corso di Cartografia numerica - Prof.ssa M. Brovelli, Politecnico di Milano

SAITO T., EGUCHI T., TAKAYAMA K. & TANIGUCHI H. (2001) - *Hazard predictions for volcanic explosions* – J. Volcan. Geoth. Res. 106, 39-51

SANTORO V. M. & FEDERICI V. (2002) – *Studio del sistema di cavità nella zona di Via S. Giosafat, sul colle Aventino a Roma: valutazione del rischio potenziale scelta degli interventi*

di consolidamento per il ripristino della viabilità. - Atti del XXI Conv. Nazi. Geotecn., AGI, L'Aquila, 595-602

SCANDONE R. & CORTINI M. (1982) – *Il Vesuvio:un vulcano ad alto rischio* – Le Scienze, 163, 92-105

SCIOTTI M. (1982) - *Engineering Geological Problems due to old Underground Quarries in the Urban Area of Rome*. - Proc. IV Congr. IAEG, New Delhi, I, 211-225

SCIOTTI M. (1984a) - *Il problema del recupero delle zone interessate da vecchie cave in sotterraneonell'area urbana di antichi centri abitati*.- Quarry and Construction.

SCIOTTI M. (1984b) - *Situazione di rischio, naturali ed indotte, in alcuni centri abitati dell'Italia Centrale. Criteri di intervento*. - II Congr. Naz. "La città difficile", Ferrara

SCIOTTI M. (1986) – *Alcune osservazioni sulla situazione stratigrafica di un'area franosa a Roma.* – AGI – XVI Conv. Naz. Geotecnica 14-16 Maggio, Bologna

SCIOTTI M. (1999) – *Rischio cavità sotterranee nel comune di Roma* - Contratto di Ricerca tra Comune di Roma Ufficio di Protezione Civile ed il Dip.to di Idraulica, Trasporti e Strade, Facoltà di Ingegneria, Univ. Di Roma "La Sapienza", Determinazione Dirigenziale n 568 del 27.12.1999, 10 Tavole scala 1:10000, 63 Tavole scala 1:20000

SIGNORINI R. (1939) – *Risultati geologici della perforazione eseguita dall'Agip alla mostra autarchica del minerale nel Circo Massimo di Ro*ma – Boll. Soc. Geol. It., 58, 60-63

SPINA G. (1958) - *Risultati di Prove Eseguite sull'argilla di Monte Mario (Roma)*.- Giorn.Genio Civile, 12-115.

TELLINI A. (1893) – *Carta geologica dei dintorni di Roma. Regione alla destra del Tever*e. Scala 1:15000, Roma

TERTULLIANI A. & RIGUZZI F. (1995) – *Earthquakes in Rome during the past one hundred years.* – Annali di Geofisica, 38, 5-6, 581-590

TILLING R. (1989) - *Volcanic hazards and their mitigations-progress and problems.* - Reviews of Geophysics, 27, Issue 2, 237-269, DOI: 10.1029/RG027i002p00237

TORO B. (1978) – *Anomalie residue di velocità e strutture profonde nelle aree vulcaniche del lazio Settentrionale* – Geologica Romana, 17, 35-44

UNIVERSITÀ DEL MINNESOTA - MapServer version 5.2.0

VACCARI F., NUNZIATA C., FAH D. & PANZA G. F. (1995) – *Reduction of seismic vulnerability of megacities: the case of Rome and Naples* – Proc. Fifth Int. Conf. Seismic Zonation, AFPS-EERI, Ouest Editions Presses Academiques, 1392-1399

VALENSISE G. & PANTOSTI D. (2001) - *The investigation of potential earthquake sources in peninsular Italy: A review* – J. Seism. 5, n3/July, 287-306

VAN ROOY J.L. & STIFF J.S. (2001) - *Guidelines for urban engineering geological investigations in South Africa.* - Bulletin of Engineering and Geological Environment 59, 285–295.

VARNES D.J. (1984) – *Hazard Zonation: A Review of a Principal and Practice* – Commision of Landslide of IAEG, UNESCO, Natural Hazards, n 3, 61

VENTRIGLIA U. (1971) – *La geologia della città di Roma.* – Amministrazione Provinciale, Roma

VENTRIGLIA U. (1988-90) – *Idrogeologia della Provincia di Roma* - Amministrazione Provinciale, Roma

VENTRIGLIA U. (2002) - *La geologia della città di Roma* – supporto CD, distribuito dall'Amministrazione Provinciale, Roma

VERRI A. (1909) – *Sulla natura del terreno di Roma a sinistra del Tevere* – Boll. Soc. Geol. It. 28, 173-202

VERRI A. (1915) – *Cenni spiegativi della Carta Geologica di Roma pubblicata dal R. Uff. Geologico su rilevamento del generale A. Verri., Novara* – Ist. Geogr. De Agostini, Novara, pp 156.

VIGGIANI G., SOCCODATO F. M. & BURGHIGNOLI A. (2004) - *Studio dell'interazione tra le opere della linea C e della metropolitana di Roma e le Mura Aureliane*.- Atti XXII Convegno Nazionale di Geotecnica AGI, Palermo,699-708

VINALE F. & SIMONELLI A.L. (1983) – *L'eterogeneità dei terreni nei fenomeni di amplificazione locale*. – XV Conv. Naz. di Geotecn., Spoleto, Vol 1

VINALE F. MANCUSO C. & SILVESTRI F. (1996) – *Dinamica dei terreni* – Manuale di Ing. Civile Vol. 1, Ed. Scientifiche A. Cremonese

VOLTAGGIO M. & BARBIERI M. (1995) - *Geochronology*. - In: The Volcano of the Alban Hills. A cura di R. TRIGILA. Tipografia SGS, Roma, 167-193

WAHBA, G. (1990) - *Spline Models for Observational Data.* - CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.

WALTHAM T. (2002) – *Sinking cities* – Geology Today, Vol. 18, n 3, May-June, 95-100.

WIEGAND, N. & ADAMS T.M. (1994) - *Using Object-Oriented Database Management for Feature-Based Geographic Information Systems.* - Journal of the Urban and Regional Information Systems Association 6, 1, 21-36

ZEGER A. (2002) – *Examining GIS decision utility for natural hazard risk modelling* – Environmental Modelling & Software 17, 287-294

APPENDICE I

1. ELENCO DELLE SIGLE LITOSTRATIGRAFICHE (dal più antico al più recente), (Funiciello & Giordano 2005, 2008):

MVA – Formazione di Monte Vaticano

MTM – Formazione di Monte Mario, **MTM1** membro del Farneto;

MDP – Formazione di Monte delle Piche

PGL1 – Formazione di Ponte Galeria – conglomerati di Casale dell'Infernaccio

PGL2 - Formazione di Ponte Galeria – *Argille ad Helicella*;

PGL3 - Formazione di Ponte Galeria – Membro della Pisana, con litofacies conglomeratico sabbiosa (**a**), argilloso-sabbiosa (**b**) e sabbiosa (**c**);

PGLa – Formazione di Ponte Galeria – litofacies conglomeratica;

PGLb - Formazione di Ponte Galeria – litofacies argilloso-sabbiosa

FCZ – Formazione del Fosso della Crescenza;

CIL – Formazione di Santa Cecilia;

TDC – Unità di Tor dè Cenci;

TIB – Unità della via Tiberina;

VGU – Formazione di Valle Giulia;

PTI – Unità del Palatino

PPT – Unità di Prima Porta

KKA – Unità di Casal del Cavaliere,

SKF – Tufi stratificati varicolori di Sacrofano;

LLL – Lava di Vallerano;

RED – Pozzolane Rosse

FTR – Unità di Fosso del Torrino, **FTR1** conglomerato giallo;

RNR – Tufo Rosso a Scorie Nere Sabatino;

LTT – Tufo stratificato varicolori di La Storta;

RMN – Lave di Fosso Tre Rami;

PNR - Pozzolane Nere;

SLV – Formazione di Fontana Centogocce; (**b**) litofacies piroclastica

VSN – Formazione di Villa Senni, (**1**) Tufo Lionato, (**2**) Pozzolanelle, (**2a**) litofacies Occhio di Pesce, (**2b**) Breccia di Colle Fumone, (**a**) litofacies ghiaioso-sabbiosa;

AEL – Formazione Aurelia;

FKB – Formazione di Madonna degli Angeli, (a) litofacies lavica, (b) litofacies piroclastica;

VTN – Formazione di Vitinia;

NMT – Unità della Via Nomentana;

SKP – Unità di Saccopastore

MAK – Unità di Valle Marciana;

MNN – Peperino di Albano;

TAL – Formazione del Tavolato;

SFTe2 – Depositi lacustri;

SFTba – Depositi alluvionali;

SFTbb – Depositi alluvionali in evoluzione;

h – terreni antropici di riporto;

h1 – terreni di risulta dell'attività di cava, discarica.

APPENDICE II

1. CENNI SUL COMPORTAMENTO MECCANICO DEI TERRENI IN SEGUITO AD EVENTI SISMICI

L'applicazione di una sollecitazione dinamica ad un mezzo continuo produce vibrazioni che si trasmettono sotto forma di onde all' interno del mezzo, che si distinguono in onde di volume:

– *onde di compressione P*;
– *onde di taglio o distorsionali S*;
e onde superficiali, che si propagano in superficie o all'interfaccia tra diversi strati:
– *onde di Rayleigh R*;
– *onde Love L*;

Le onde P sono associate a stati deformativi di compressione e dilatazione volumetrica e la velocità di propagazione dipende dal modulo di rigidezza a compressione monodimensionale (E_{ed}) e dalla densità del mezzo (ρ):

$$\mathbf{V_P} = (E_{ed}/\rho)^{1/2} \qquad (1)$$

In terreni saturi la velocità di propagazione v_p dipende essenzialmente dalla compressibilità del fluido, assumendo valori di circa 1450 m/s.
Le onde S sono, invece, onde di taglio e la loro velocità di propagazione dipende dalla rigidezza del materiale (G) e dalla densità del mezzo(ρ):

$$\mathbf{V_S} = (G/\rho)^{1/2} \qquad (2)$$

Non si propagano nei fluidi e quindi la rigidezza è quella dello scheletro solido e la densità è quella del mezzo bifase solido-acqua che attraversano.
Considerata la limitata variabilità in natura della densità dei terreni e rocce, consegue che le onde sismiche si propagano nel sottosuolo con velocità proporzionale alla rigidezza del materiale.

In uno stesso tipo di materiale le velocità di propagazione dei vari tipi di onda differiscono tra loro in base alle proprietà fisiche ed all'ampia eterogeneità di tipo strutturale, tessiturale e chimico-fisica dei terreni naturali. Velocità inferiori alla velocità del suono nell'aria 344 m/s sono misurabili in terreni soffici superficiali anidri con elevato contenuto di materiali organici. Gli stessi materiali saturi di acqua incrementano i loro valori sino a 500-800 m/s.

La fenomenologia di un evento sismico richiede l'analisi del comportamento meccanico del terreno in condizioni di taglio semplice, vale a dire in corrispondenza di un processo di carico che sottopone l'elemento di sottosuolo, a partire da condizioni geostatiche (σ'_{vh0}), ad una tensione tangenziale variabile nel tempo con legge irregolare $\tau(t)$.Per un singolo processo di carico-scarico-ricarico in termini di tensioni tangenziali, il terreno mostra un comportamento efficacemente rappresentabile mediante una coppia di parametri (Fig. I):

- il modulo di rigidezza al taglio G
- il fattore di smorzamento D (*Damping ratio*).

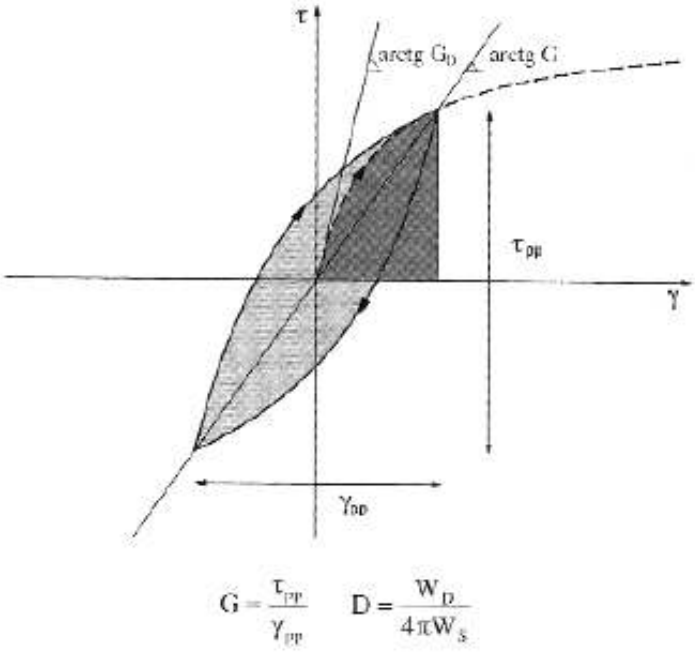


Figura I: Definizione del modulo di rigidezza a taglio, G, e del fattore di smorzamento, D, in un ciclo e di ampiezza γ.

Tali parametri variano con il livello di deformazione tangenziale γ impresso all'elemento di volume; si osservano all'aumentare delle deformazioni, tre campi di comportamento

contigui (Fig. II): (A) pseudo-lineare, a piccole deformazioni, (B) non lineare stabile, a medie deformazioni, (C) non lineare degradabile a grandi deformazioni (fino alla rottura).

(A) *Comportamento a piccole deformazioni*: Il modulo secante G, assume un valore iniziale massimo (G_0 o Gmax),si mantiene pressoché costante per livelli deformativi inferiori alla soglia di linearità γ_l (compreso tra 0.0001% e 0.01% in relazione alle caratteristiche granulometriche del terreno, quando $G=0.95G_0$) per poi ridursi progressivamente all'aumentare della deformazione. Per $\gamma<\gamma_l$ la risposta durante un ciclo completo è caratterizzata da energia dissipata percentualmente molto ridotta rispetto a quella impressa (D prossimo a 0). Il legame τ-γ è rappresentabile con un modello lineare elastico o visco-elastico.

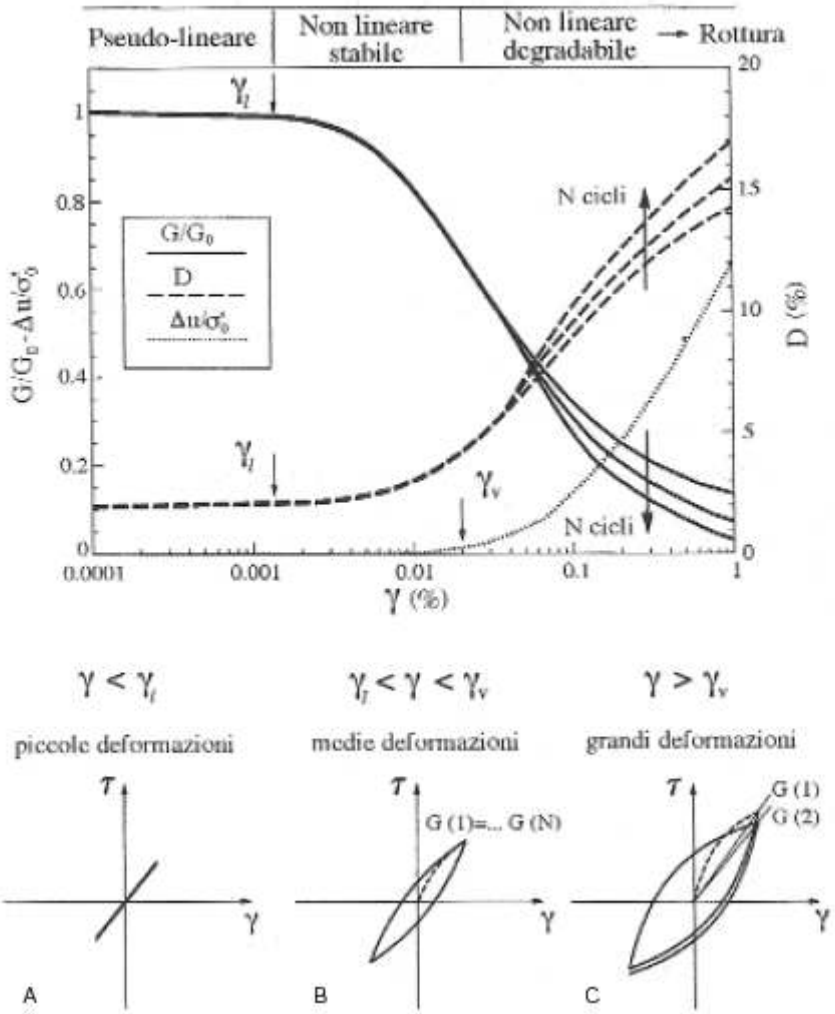


Figura II: Livelli deformativi ed aspetti del comportamento meccanico del terreno in condizioni di taglio semplice ciclico.

(B) *Comportamento a medie deformazioni*: per $\gamma>\gamma_l$ il terreno mostra un comportamento fortemente non lineare e dissipativo, marcato da una sensibile riduzione di G e da un

corrispondente aumento di D con γ. L'aspetto dei cicli τ-γ si modifica al crescere dell'ampiezza della sollecitazione, ma il materiale conserva un comportamento indipendente dalla storia di carico; infatti, in cicli di ampiezza costante, il terreno ripercorre lo stesso ciclo tensione-deformazione. Il legame τ-γ è rappresentabile con un modello lineare equivalente.

(C) *Comportamento a grandi deformazioni*: all'aumentare dell'ampiezza delle sollecitazioni cicliche si individua una ulteriore livello di deformazione definita come soglia volumetrica γ_v, superiore alla soglia lineare di uno-due ordini di grandezza, al di là della quale il terreno risente delle distorsioni volumetriche sommate a quelle distorsionali. In termini di G e D, il comportamento meccanico evolve in genere degradando con il numero di cicli di carico N.

A partire da dati sperimentali, si può affermare che i volumi di terreno coinvolti in occasione di terremoti di alta magnitudo sono interessati da uno stato di deformazione contenuto, con ampiezze γ entro l'ordine dell'1% (Lanzo & Silvestri 1999). Per gli studi di microzonazione o risposta sismica locale è possibile e necessario, quindi, caratterizzare il comportamento meccanico del terreno mediante la determinazione sperimentale delle curve G-γ e D-γ. In Figura III sono illustrate le principali prove geotecniche/geofisiche in sito ed in laboratorio rispetto ai livelli deformativi

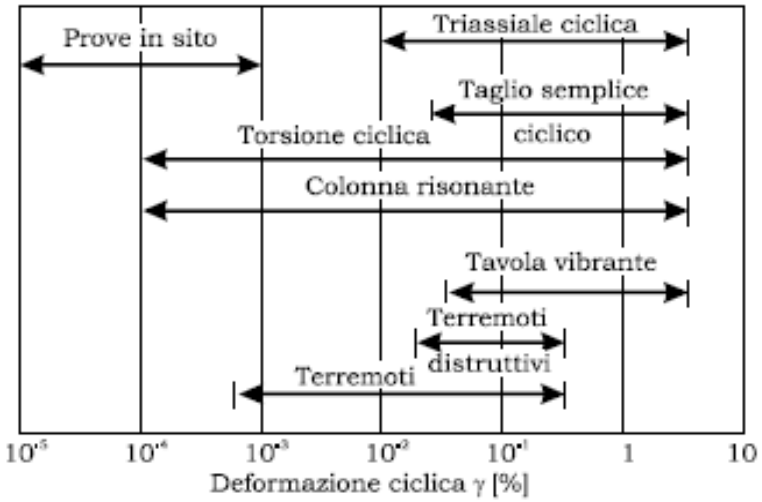


Figura III: Livelli deformativi interessati da prove in sito e di laboratorio utili alla determinazione dei parametri di deformabilità e delle proprietà cicliche dei terreni

Le caratteristiche tecnologiche e le procedure di prova relative alle tecniche più diffuse, peraltro in continua evoluzione, sono descritte in numerosi testi (i.e. Mancuso 1996, Vinale *et alii* 1996).

Le prove in sito offrono il vantaggio di descrivere con continuità le caratteristiche del terreno in sede, ma è limitata al campo lineare delle piccole deformazioni. Le prove di laboratorio consentono l'analisi di un campo di sollecitazioni e deformazioni più ampio, ma presentano il problema del disturbo dovuto al campionamento e alla preparazione dei provini, difficoltà nel riprodurre lo stato tensionale in sito, nonché le dimensioni ridotte dei provini rispetto ai volumi significativamente coinvolti in sito nell'interazione terreno-strutture. E' necessario quindi integrare le diverse prove e comunque sempre affiancarle ai tradizionali metodi di indagine, indispensabili per la completa caratterizzazione geotecnica del sottosuolo.

2. Prove sismiche in foro di tipo Cross Hole

Le prospezioni sismiche *cross hole* consistono in misure di velocità orizzontale delle onde elastiche longitudinali e trasversali (Fig. IV).

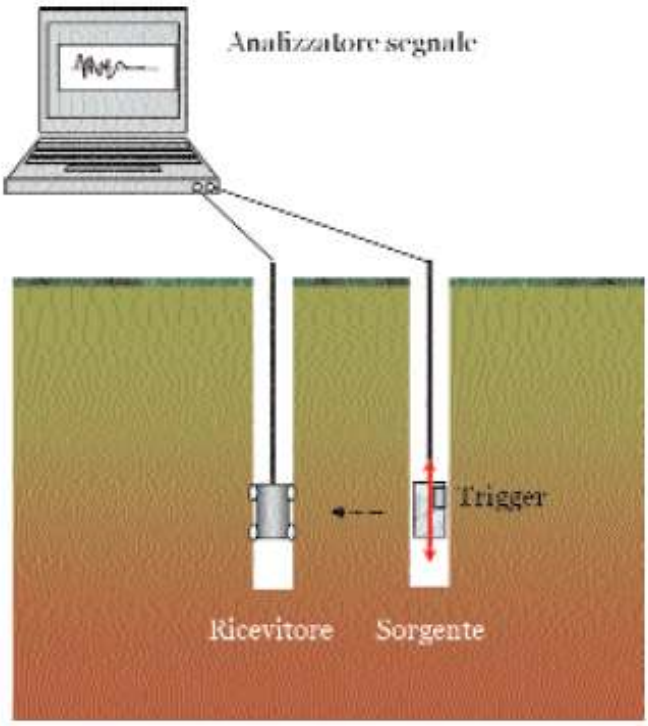


Figura IV: Schema sperimentale per le prove di tipo *cross hole*.

Per effettuare la prova sono necessari almeno due fori di sondaggio nei quali calare un energizzatore (sorgente di onde meccaniche) e il ricevitore o geofono. I due fori sono a distanza ravvicinata per garantire che le onde attraversino terreni simili che si approssimano in giacitura suborizzontale. Nella fase preliminare, i fori sono stati opportunamente attrezzati con una tubazione in PVC (materiale ad alta impedenza alle vibrazioni) del diametro di 76 mm; lo spazio anulare fra il foro e i tubi è stato riempito con una malta a ritiro controllato o nullo al fine di garantire la continuità della struttura terreno-tubazione. Al termine del condizionamento occorre effettuare misure di verticalità dei fori. Le prescrizioni e maggiori dettagli esecutivi della prova *cross hole* si trovano nelle regole ASTM D4428M-91.

Sostanzialmente, dopo la misura di verticalità di una coppia fori ubicati a circa 5 metri di distanza, si sono misurati i tempi di arrivo delle onde P ed S, generate da una sorgente ad esplosione e registrate da un geofono tridimensionale calato alla stessa profondità della sorgente nell'altro foro. Si sono quindi derivate le velocità v_s, v_p (velocità onde = distanza tra i fori alla quota di misura / tempo di arrivo dell'onda).

Determinate inoltre le densità dei diversi strati attraversati tramite prove di laboratorio, si sono calcolati i seguenti parametri elastici e geomeccanici:

1) il modulo di taglio iniziale o massimo $\mathbf{G_{max}} = \rho v_s^2$ (dalla 2)

2) il coefficiente di Poisson $\mathbf{\nu} = 0.5*[(v_p/v_s)^2-2]/[(v_p/v_s)^2-1]$

3) il modulo di Young $\mathbf{E} = 2\rho v_s^2(1+\nu)$

4) modulo edometrico $\mathbf{E_{ed}} = \rho v_P^2$ (dalla 1)

Nel caso di un mezzo elastico ideale $Eed = E(\nu+1)/(1-\nu-2\nu^2)$ ed esso rappresenta la rigidezza normale del mezzo in condizioni di deformazione laterale impedita.

I parametri di deformabilità così ottenuti permettono di determinare parzialmente le proprietà dinamiche dei terreni in quanto il fattore di smorzamento e l'andamento delle curve τ-γ e τ–D dove τ è lo sforzo di taglio, γ la deformazione tangenziale e D è il fattore di smorzamento, è determinabile da prove di laboratorio cicliche (i.e. triassiale ciclica, ecc) e dinamiche (i.e. colonna risonante, ecc). Le prove di laboratorio permettono di investigare quindi in un ampio intervallo di condizioni di deformazione, la riduzione o degradazione del modulo di taglio all'aumentare dei cicli di carico e scarico. Nella caratterizzazione geotecnica sia in condizioni statiche sia in condizioni dinamiche, le prove in sito e in

laboratorio sono complementari per la determinazione del comportamento geomeccanico del terreno in funzione delle condizioni al contorno ed in termini di pressioni efficaci.