

# La Geotecnica delle grandi aree\*

Leonardo Cascini\*\*

## Summary

In meno di un secolo dalla formalizzazione delle leggi che ne sono alla base, la Geotecnica ha compiuto progressi talmente significativi da rendere, di fatto, possibile la progettazione, la direzione dei lavori e il collaudo di tutte le opere che interagiscono con terreni e rocce (fondazioni, opere di sostegno, gallerie, interventi di stabilizzazione dei pendii, dighe, ecc.) secondo canoni rigorosi e procedure codificate. In virtù delle conoscenze sin qui acquisite, possono considerarsi ormai maturi i tempi per l'accettazione di una ulteriore sfida che veda la Geotecnica sempre più protagonista nella trattazione di ulteriori problematiche complesse quali la gestione del territorio e la valorizzazione della risorsa suolo, che rendono indispensabile il ricorso ai criteri propri dell'ingegneria per garantire la necessaria sicurezza e, nel contempo, creare le condizioni per uno sviluppo sostenibile.

Ed è proprio nell'ottica innanzi delineata che la presente nota, partendo dalle origini della Geotecnica e con l'ausilio della letteratura, propone un approccio metodologico per affrontare tali problematiche fornendo esempi concreti di analisi di stabilità dei versanti e di subsidenza che, per essere adeguatamente sviluppati, richiedono una profonda comprensione del regime delle acque sotterranee. La nota dedica, infine, una particolare attenzione sia alla nuova tecnologia, che ha recentemente compiuto passi in avanti particolarmente significativi, e sia alla normativa che richiede adeguati aggiornamenti per l'applicazione corrente delle metodologie proposte.

## 1. Introduzione

La Geotecnica nasce in un periodo indistinto del primo ventennio del secolo scorso quando, da una parte, valenti ingegneri si cimentavano con la progettazione e realizzazione di opere importanti sul territorio che, proprio per la loro imponenza, creavano non pochi problemi esecutivi e, dall'altra, il giovane Terzaghi lanciava segnali evidenti sulla comprensione profonda della meccanica dei mezzi a più fasi e sulla necessità di inquadrare i principi fondamentali della disciplina secondo leggi ancora non scritte [TERZAGHI, 1923; 1925]. Questo breve periodo di incubazione terminò il 1936 ad Harvard, quando TERZAGHI [(1936) formalizzò per la prima volta, nel corso della Conferenza Internazionale su "Soil Mechanics and Foundation Engineering", il principio delle tensioni efficaci. Seguirono altri lavori fondamentali che svilupparono, da una parte, le equazioni che governano fenomeni di grande rilevanza e, dall'altra, le tecniche sperimentali che rappresentano l'altro indispensabile punto di riferimento della Geotecnica. Tra tutti si ricordano, per la loro valenza, i lavori di

BIOT [1941], che viene riconosciuto da WANG [2000] come fondamentale per l'analisi di problemi applicativi complessi, e l'opera di Casagrande che nel 1933 introdusse un corso all'Università di Harvard che rappresenta, a sua volta, una pietra miliare della sperimentazione geotecnica [WILSON *et al.*, 1982].

Sono, quindi, seguiti altri eccellenti contributi che hanno consentito alla Geotecnica di compiere quei progressi che, di fatto, rendono oggi possibile la progettazione, la direzione dei lavori e il collaudo di tutte le opere che interagiscono con terreni e rocce (fondazioni, opere di sostegno, gallerie, interventi di stabilizzazione dei pendii, dighe, ecc.) secondo canoni rigorosi e procedure codificate, accessibili a tutti gli addetti ai lavori.

Con il passare del tempo le sfide sono diventate progressivamente più difficili sia per la crescente complessità delle opere da realizzare e sia per l'incalzante richiesta di sicurezza della società verso fenomeni che, fortunatamente, sono ormai visti non come calamità naturali quanto piuttosto come eventi straordinari da contrastare con efficienza per prevenirne le conseguenze. A ciò si deve aggiungere la nascente consapevolezza del suolo come risorsa che, come tale, deve essere salvaguardata e valorizzata nell'ottica dello sviluppo sostenibile.

\* Versione Italiana del testo della Croce Lecture

\*\* Università di Salerno

Gli esempi che si potrebbero citare in tal senso sono molteplici e riguardano tutti i paesi del mondo. Volendo limitare l'attenzione all'Italia, quale caso tipico di complessità di opere da realizzare in ambienti urbani di grande valore e di elevata densità urbana, si cita la linea C della metropolitana di Roma che richiede una progettazione e modalità costruttive avanzate per garantire la necessaria salvaguardia di numerosi edifici storici e di monumenti di straordinario valore [BURGHIGNOLI, 2011]. Con riferimento alla seconda tematica, l'autore ricorda la gestione scientifica a lui affidata dell'emergenza idrogeologica del maggio 1998 quando gli fu chiesto di fornire risposte rapide e consistenti a molteplici quesiti per i quali all'epoca non erano disponibili metodi e procedure standardizzate [CASCINI, 2004]. Infine, per quanto riguarda il terzo tema si va fortunatamente sempre più affermando il concetto che la risorsa suolo non può e non deve essere più considerata inesauribile, meritando viceversa quella attenzione che, da sempre, viene giustamente riservata alla risorsa acqua ([http://ec.europa.eu/agriculture/envir/soil/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/agriculture/envir/soil/index_en.htm)).

Gli esempi appena mostrati evidenziano le sfide che la nostra comunità è chiamata ad affrontare e alle quali bisogna fornire risposte esaustive e avanzate, che appaiono oggi possibili sia per la robustezza dell'impianto teorico e delle tecniche sperimentali alla base della disciplina e sia per alcuni esempi significativi presenti nella letteratura.

La presente nota intende fornire un contributo metodologico oltre che concreto sul tema che, nell'autore, è stato stimolato fin dall'inizio della carriera all'Università della Calabria presso la quale, già 50 anni or sono, era stato istituito il Corso di Laurea in Ingegneria civile per la difesa del suolo e la pianificazione territoriale, nel quale era previsto, in un'ottica lungimirante, il corso di Geotecnica regionale, finalizzato insieme agli altri a formare l'Ingegnere del Territorio al quale demandare la salvaguardia di sistemi geotecnici complessi e l'attuazione degli insediamenti territoriali attraverso la migliore valorizzazione delle risorse naturali. È interessante osservare che il Bollettino di informazione della Facoltà di Ingegneria dell'Università della Calabria (1973) sottolinea che "... *l'esigenza di questo tipo di tecnico è sentita da anni nella Pubblica Amministrazione e la sua utilizzazione va al di là dei bisogni della Regione calabrese per costituire un investimento di interesse nazionale ...*"

In quegli anni un'importante tappa in Italia, proprio nella direzione della Geotecnica delle grandi aree, è rappresentata dal Convegno Nazionale di Geotecnica del 1975 e dalla tavola rotonda presieduta dal prof. Arrigo Croce, fondatore della Geotecnica in Italia, che impostò i lavori su una serie di domande fondamentali che possono così riassumersi:

- che cos'è la Geotecnica del territorio;
- come, quando, perché è utile nel processo di pianificazione;

- con quali strumenti di carattere giuridico e di carattere amministrativo uno schema del genere potrebbe effettivamente avere significato; o se, invece, all'atto pratico sarebbe un nulla ossia non sarebbe possibile farne niente.

L'autore è fermamente convinto che una risposta ai quesiti formulati da Croce al Convegno di Cosenza possa facilitare lo sviluppo di un quadro teorico di riferimento di una Geotecnica nuova che sia finalizzata ad affrontare le tematiche territoriali con l'ausilio di procedure quantitative tipiche dell'Ingegneria. A questo scopo la presente nota preliminarmente elenca alcune delle problematiche da affrontare evidenziando similitudini e differenze con quelle classiche che si basano su tre pilastri rispettivamente rappresentati dal principio delle tensioni efficaci, l'ipotesi di continuità e il concetto di REV (Representative Elementary Volume). Sulla base di tali presupposti la nota fornisce, quindi, un approccio metodologico per affrontare le problematiche su area vasta con la mentalità tipica dell'ingegnere. L'applicabilità dell'approccio alla risoluzione di problemi concreti è supportata da esempi di studi su fenomeni franosi e subsidenza che, entrambi, richiedono un'approfondita comprensione ed un'analisi adeguata del regime delle acque sotterranee. La nota evidenzia, infine, il ruolo crescente che sta acquisendo la tecnologia nella risoluzione delle problematiche territoriali e la improcrastinabile necessità di aggiornare la normativa per consentire l'uso dell'approccio proposto nella pratica corrente.

## 2. Le tematiche territoriali

### 2.1. Specificità, diffusione e rilevanza

Numerosi sono i fenomeni naturali e di origine antropica che causano sistematicamente la perdita di vite umane e danni economici ingenti come messo in luce dalle fonti bibliografiche disponibili e, in particolare, da alcuni database [CRED, 2015; ICL, 2015; MUNICH RE, 2015; USGS, 2015].

Dalle fonti bibliografiche emerge che uno dei territori maggiormente colpiti dagli hazard naturali è l'Italia che è riconosciuta come la nazione a più alto rischio da frana in Europa [GUZZETTI, 2000] essendo sede di un numero rilevante di fenomeni, circa 500.000 inventariati a scala 1:25.000 [VAN DEN EECKHAUT e HERVÁS, 2012], che minacciano un territorio densamente urbanizzato. Inoltre, da Nord a Sud numerose città e comuni sono sistematicamente affetti da eventi sismici o da fenomeni di subsidenza indotta da estrazione di fluidi dal sottosuolo e, soprattutto, di acqua che rappresenta un inestimabile patrimonio del nostro territorio. Infine, una rete estesa di gallerie, resa necessaria dalla conformazione morfologica del territorio, e la presenza di miglia-

ia di dighe a gravità e di terra richiamano ulteriormente l'attenzione sulla necessità di una adeguata analisi e gestione delle tematiche territoriali.

In considerazione della rilevanza di questi hazards, molteplici iniziative (progetti di ricerca, leggi, direttive, etc.) sono state sviluppate a livello internazionale e nazionale per mitigare il rischio per la vita umana e per la proprietà (edifici e infrastrutture, ecc.), come discusso ampiamente nel capitolo 6. Qui l'autore sottolinea che risposte scientificamente basate a queste iniziative possono essere fornite soltanto con l'ausilio di nuove metodologie e procedure in grado di analizzare e gestire, in tempi non particolarmente lunghi, fenomeni diffusi in aree di rilevante estensione che non possono essere investigati, monitorati e studiati come se ognuno di essi fosse caratterizzato da un meccanismo unico ed irripetibile. Una proposta metodologica per raggiungere questo obiettivo è introdotta e discussa nei paragrafi che seguono.

## 2.2. Il ruolo centrale della scala topografica

L'area sede di hazards naturali o di origine antropica può identificarsi, dal punto di vista della gestione del territorio, con quella di una piccola estensione di terreno, un quartiere, una città, una regione, o l'intera nazione. Ne consegue che la dimensione dell'area da analizzare può cambiare notevolmente da caso a caso, come messo in luce nella figura 2.1 che riporta un pendio, un massiccio e l'intera Regione Campania potenzialmente sede di fenomeni franosi di flusso rapido paragonabili a quelli che, nel 1998, causarono 160 vittime e danni economici ingenti [CASCINI, 2005].

La figura 2.1 lascia trasparire che le analisi da svolgere e lo scopo da perseguire variano in funzione della dimensione dell'area di studio che, a sua volta, rende necessario il ricorso a scale topografiche e modelli di analisi differenti in quanto l'implementazione su area vasta dello stesso modello utilizzato per il singolo pendio è proibitivo dal punto di vista tecnico ed economico, oltre a non avere alcun significato dal punto di vista gestionale. La letteratura scientifica fornisce numerosi esempi di procedure finalizzate a perseguire questo scopo. Tra queste, la più sviluppata è quella sulla zonazione del rischio da frana che è brevemente riassunta nei paragrafi successivi insieme ad una breve introduzione sulla terminologia di riferimento.

## 2.3. Analisi dei fenomeni franosi a differenti scale topografiche di riferimento

In FELL *et al.* [2008a] sono fornite le definizioni di base della carta inventario dei fenomeni franosi, della loro probabilità di accadimento spaziale (su-

scettibilità) e temporale (pericolosità) e del rischio connesso con il loro accadimento. In particolare nella versione italiana del documento ([http://www.associazionegeotecnica.it/sites/default/files/linee\\_guida\\_jtc-1\\_italiano\\_agi.pdf](http://www.associazionegeotecnica.it/sites/default/files/linee_guida_jtc-1_italiano_agi.pdf)) si legge che:

- **Inventario dei fenomeni franosi.** L'inventario contempla la localizzazione, la classificazione, il volume, lo stato di attività, la data di accadimento e altre informazioni utili a caratterizzare le frane ricadenti all'interno di un'area.
- **Suscettibilità da frana.** Può intendersi la stima – quantitativa o qualitativa – della tipologia, del volume (o dell'area) nonché della distribuzione delle frane esistenti o che potrebbero verificarsi all'interno di una ben determinata area. La suscettibilità potrebbe anche includere una descrizione della velocità e della intensità delle frane esistenti o potenziali. Sebbene ci si attenda che le frane accadano più frequentemente nelle aree più suscettibili, nell'analisi della suscettibilità il fattore tempo non è esplicitamente considerato. La suscettibilità da frana include le frane che presentano la zona d'innescò all'interno dell'area, o quelle che potrebbero innescarsi all'esterno dell'area ma evolvere al di sopra o retrocedere all'interno della stessa.
- **Pericolosità.** Individua una condizione con un potenziale tale da causare conseguenze indesiderate. La descrizione della pericolosità da frana dovrebbe includere la localizzazione, il volume (o l'area), la classificazione e la velocità delle frane potenziali – includendo ogni altro materiale che, una volta distaccato dalla sua sede naturale, ne risulta coinvolto – nonché la probabilità di accadimento in un assegnato intervallo di tempo
- **Elementi a rischio.** La popolazione, gli edifici e le opere d'ingegneria, le attività economiche, le opere di interesse pubblico, altre infrastrutture e i beni ambientali in un'area potenzialmente affetta da frane.
- **Vulnerabilità.** Grado di perdita atteso a un elemento o a un insieme di elementi posti all'interno di una data area per effetto di un fenomeno franoso. È espressa in una scala che va da 0 (nessuna perdita) a 1 (perdita totale). Per le proprietà, la perdita corrisponde all'entità economica del danno rapportata al valore della proprietà; per le persone, la vulnerabilità si fa coincidere con la probabilità che una particolare persona (elemento a rischio), tra tutte quelle interessate da una frana, perda la propria vita;
- **Rischio.** Entità della probabilità e della severità delle conseguenze dei fenomeni franosi sulla salute, sulla proprietà e sull'ambiente. Il rischio è spesso ottenuto come prodotto della probabilità di accadimento di un fenomeno di assegnato volume per le conseguenze attese. Occorre, comunque, considerare che un modello interpre-

tativo più generale richiede il confronto della probabilità di accadimento e delle conseguenze senza passare necessariamente attraverso il loro prodotto. Nell'ambito della stima Quantitativa del Rischio si raccomanda di fare riferimento all'intensità del fenomeno franoso.

[...] il rischio è altresì definito: a) *per la perdita di vita umana*, come la probabilità annuale che una persona a rischio possa perdere la propria vita, tenendo conto della pericolosità del fenomeno franoso, della probabilità spazio-temporale e della vulnerabilità della persona; b) *per la perdita di proprietà*, come la probabilità annuale che si verifichi un assegnato livello di danno o la perdita annuale che deriva dal portare in conto gli elementi a rischio, la loro probabilità spazio-temporale e la loro vulnerabilità.

- **Zonazione.** La partizione del territorio in aree o domini omogenei e la loro classifica (*ranking*) in accordo con i livelli di suscettibilità, pericolosità e rischio da frane attuali o potenziali ovvero con l'applicabilità di ben definite norme di attuazione.

Sulla base di queste definizioni, FELL *et al.* [2008a] individuano e mettono tra loro in relazione la scala topografica, la dimensione dell'area, lo scopo e i metodi di zonazione (Tab. I). Secondo quanto definito da SOETERS e VAN WESTEN [1996] e FELL *et al.* [2008b] questi ultimi possono essere raggruppati in tre differenti classi nelle quali rientrano rispettivamente i metodi euristici, empirici/statistici e deterministici/probabilistici.

Nei metodi **euristici** la zonazione è sviluppata con il cosiddetto "giudizio esperto" dal momento che la realtà è interpretata attraverso l'osservazione e/o gli strumenti tipici della geologia/geomorfologia. Questi metodi sono soggettivi in quanto la qualità dei risultati è strettamente legata all'esperto che svolge l'analisi e al tempo che ad essa viene dedicato; in ogni caso tecnici (geologi e/o ingegneri geotecnici) particolarmente qualificati sono in grado di fornire risultati molto accurati. I metodi euristici possono essere implementati in ambiente GIS, attraverso la combinazione di una serie di fattori che condizionano l'occorrenza dei fenomeni franosi; le tecniche a tal fine utilizzate sono numerose e tra queste si citano la logica Fuzzy e l'analisi spaziale multi-criteriale.

I **metodi empirici** si basano su osservazioni di campo dei fenomeni franosi e degli elementi esposti al rischio, le cui risultanze sono utilizzate per individuare relazioni talora su base statistica tra gli elementi acquisiti, utili per molteplici scopi quali, per esempio, la valutazione della propagazione di un evento, la previsione delle conseguenze etc. I metodi empirici si basano su assunzioni semplificate e, di conseguenza, ad essi non può essere spesso attribuito un significato evidente [HUNGR *et al.*, 2005]. Nei **metodi statistici** i fattori che hanno concorso nel pas-

sato all'innescò di frane, generalmente di primo distacco, sono stimati con analisi bivariate e/o multivariate e/o con l'ausilio delle reti neurali e, sulla base di tali stime, si effettuano previsioni quantitative sull'innescò di frane in aree aventi caratteristiche simili.

I **metodi deterministici** applicano soluzioni analitiche derivanti dalla teoria dell'equilibrio limite o dai teoremi dell'analisi limite ovvero tecniche di risoluzione numerica (differenze finite, elementi finiti/di contorno/distinti); su essi si basano, altresì, i modelli fisicamente basati quali SHALSTAB [MONTGOMERY e DIETRICH, 1994] e TRIGRS [BAUM *et al.*, 2002] utili per analisi su area vasta. Questi modelli richiedono dati di input di alta qualità relativamente a numerosi fattori quali la topografia dei versanti, la costituzione del sottosuolo, il regime delle acque sotterranee, le proprietà meccaniche dei terreni, gli elementi esposti e la loro vulnerabilità. Le incertezze presenti nei dati di input possono essere portate in conto nei **metodi probabilistici** tra cui si citano il FORM, il FOSM e il Monte-Carlo [NADIM *et al.*, 2005].

Facendo riferimento a quanto proposto in letteratura per la zonazione del rischio da frana si può ritenere che i problemi in figura 2.1 possano essere analizzati utilizzando rispettivamente metodi deterministici/probabilistici (Fig. 2.1a), empirici/statistici (Fig. 2.1b) ed euristici (Fig. 2.1c) dei quali nei capitoli successivi si mostrano esempi di applicazione a casi reali.

Un'altrettanto ricca letteratura non esiste per gli elementi che interagiscono con i fenomeni franosi o con gli altri hazard in precedenza richiamati e soltanto pochi esempi sono forniti per la loro identificazione/quantificazione [VAN WESTEN, 2004; VAN WESTEN *et al.*, 2008] e per l'analisi/zonazione delle conseguenze [AMATRUDA *et al.*, 2004; REMONDO *et al.* 2005; KAYNIA *et al.*, 2008; PISCIOTTA, 2008]. In ogni caso, in analogia con quanto argomentato per i fenomeni franosi, a scala di dettaglio (Fig. 2.2a) è necessario definire per gli edifici la geometria, le proprietà dei materiali, l'età, gli elementi progettuali più significativi, le condizioni del sottosuolo ecc., vale a dire tutti quegli elementi che concorrono alla valutazione del danno che esse possono subire in conseguenza di un hazard. Al contrario a scale meno dettagliate, quale per esempio la scala media (Fig. 2.2b), possono essere introdotte unità di riferimento nelle quali raggruppare elementi tra loro omogenei [VAN WESTEN *et al.*, 2008] mentre a piccola scala (Fig. 2.2c) gli aggregati possono contenere gruppi di edifici caratterizzati da una relativa omogeneità per quanto riguarda la tipologia strutturale, i materiali di costruzione, etc.

Così procedendo si deduce che i metodi tradizionali della Geotecnica risultano applicabili esclusivamente per l'analisi di singoli edifici a scala di dettaglio. In ogni caso, è doveroso sottolineare che laddove si debba ricorrere all'aggregazione di ele-

menti strutturali tra loro omogenei, è possibile acquisire con le indagini di campo utili informazioni sull'interazione tra detti aggregati e le fenomenologie che li minacciano [CASCINI *et al.*, 2008c]. Le interazioni possono, a loro volta, essere oggettivate con analisi di tipo statistico ed utilizzate per la stima preliminare della vulnerabilità degli aggregati omogenei, che assume grande rilievo nella pianificazione territoriale e nella gestione delle risorse presenti sul territorio [VISCARDI, 2010]. Naturalmente, in presenza di aggregati tra loro relativamente omogenei a piccola scala, i dati acquisiti hanno una valenza di tipo ricognitivo e, come tali, possono essere elaborati esclusivamente sulla base del giudizio esperto all'interno di procedure di tipo qualitativo, utilizzabili per una preliminare classifica delle aree maggiormente danneggiabili da ben determinate classi di fenomeni naturali e/o antropici [PISCIOTTA, 2008].

### 3. Un approccio metodologico per l'analisi delle tematiche territoriali

Un quadro teorico di riferimento sulle procedure da privilegiare a differenti scale topografiche di riferimento potrebbe notevolmente semplificare l'analisi delle tematiche territoriali per le quali non si dispone, purtroppo, di punti di riferimento nella letteratura. Per fornire un contributo sull'argomento qui di seguito si propone un approccio metodologico che prende le mosse da alcune considerazioni preliminari sui metodi usualmente adottati nella risoluzione di problemi classici della Geotecnica che, come già ricordato nella introduzione, si basano su tre concetti di base. Il principio delle tensioni efficaci, l'ipotesi di continuità e il REV che in LANCELOTTA [2004] è così descritto: *Il Volume Elementare Rappresentativo (REV) è il più piccolo volume di omogeneizzazione che, alla scala macroscopica, può essere trattato come un punto del mezzo continuo e che, alla scala microscopica, contiene un numero significativo di elementi caratterizzanti la struttura del mezzo poroso.*

Tra i tipici esempi di applicazione del REV per la risoluzione di due problemi classici della Geotecnica si cita il calcolo dei cedimenti di una fondazione superficiale che, per essere affidabile, richiede la disponibilità di: un'accurata sezione stratigrafica di progetto nella quale siano definiti l'andamento spaziale dei litotipi presenti nel sottosuolo unitamente alle loro proprietà meccaniche e al regime delle pressioni neutre; una stima delle tensioni indotte dai carichi nel sottosuolo; un modello che integri, con i dati di input e le condizioni al contorno, le equazioni differenziali formulate alla scala del REV. I risultati che così si ottengono consentono di effettuare la stima dei cedimenti la cui validità può essere confer-

mata nel tempo attraverso la comparazione tra previsione di progetto e reale comportamento dell'opera.

Un approccio simile è usualmente seguito nell'analisi di stabilità di un pendio anche se, talora, questa problematica richiede un impegno maggiore per quanto concerne i fattori esterni [TERZAGHI, 1950] che condizionano l'evoluzione del pendio quali, per esempio, piogge e sisma (Fig. 3.1). Inoltre, i modelli di calcolo possono essere calibrati e validati laddove si disponga, per un congruo periodo di tempo, di un sistema avanzato di monitoraggio del pendio come illustrato e discusso nel capitolo successivo.

Facendo riferimento alla figura 3.1 e ad altri problemi classici della Geotecnica la prima questione alla quale dare una risposta riguarda l'applicabilità di un'analoga procedura quando problemi simili si vogliono analizzare su aree di rilevante estensione. Una risposta positiva a questo quesito è fornita dai modelli fisicamente basati [WARD *et al.*, 1982; MONTGOMERY e DIETRICH, 1994; DIETRICH *et al.*, 1995; WU e SIDLE, 1995; PACK *et al.*, 1998; VAN ASH *et al.*, 1999; BAUM *et al.*, 2002; SAVAGE *et al.*, 2004] che tipicamente accoppiano un modello idrologico per l'analisi del regime di pressioni neutre con un modello a pendio indefinito per la valutazione del coefficiente di sicurezza. Una tipica applicazione dei modelli fisicamente basati è descritta in SALCIARINI *et al.* [2008] che fornisce una cartografia delle frane superficiali indotte da piogge per la città di Seattle (Fig. 3.2).

In ogni caso, l'affidabilità dei risultati conseguiti con i modelli fisicamente basati può decrescere in misura significativa all'aumentare dell'estensione dell'area di studio in considerazione della incapacità dei dati di input e del modello numerico di interpretare *i)* la crescente complessità dei fattori geologici e geotecnici e *ii)* i meccanismi che avvengono all'interno, come discusso nel paragrafo 4.2 che si focalizza sulle frane superficiali della Regione Campania in Italia. Pertanto, all'aumentare delle dimensioni dell'area e al diminuire della scala topografica di riferimento necessariamente bisogna fare riferimento ad un differente approccio che sia in grado di sviluppare un'analisi fisicamente basata.

Il capitolo 2 introduce la strategia usualmente adottata nell'analisi dei fenomeni franosi che usualmente viene svolta con differenti metodi (deterministici/probabilistici, empirici/statistici, euristici) passando dalla scala di dettaglio a quella piccola. L'autore ritiene che questa strategia permanga valida per lo studio di molti altri fenomeni che possono avere luogo in aree di rilevante estensione. Pertanto, le analisi che non fanno riferimento ai capisaldi della meccanica (principio delle tensioni efficaci, continuità e REV), e svolte essenzialmente con un giudizio esperto o con modelli di tipo statistico, devono essere necessariamente irrobustite e permeate di un significato meccanico del quale non c'è attualmente traccia nella letteratura scientifica.

Utili indicazioni che possono riempire questo vuoto scaturiscono dalla letteratura sulle analisi multivariate che, in aree di rilevante estensione, sono finalizzate a correlare statisticamente i fattori predisponenti con le cause innescanti i fenomeni franosi (e.g., CARRARA, 1983; GUZZETTI *et al.*, 1999; VAN WESTEN, 2004). La letteratura propone numerosi metodi di analisi tra i quali di particolare interesse appare la proposta metodologica di CALVELLO *et al.* [2013], che distinguono *terrain computational units* (TCUs), ovvero unità che fanno riferimento al dominio utilizzato per definire, calibrare e validare un modello di analisi delle frane, e *terrain zoning units* (TZUs), che sono utilizzate per produrre la carta delle frane a fini di zonazione. Questa distinzione introduce il seguente principio: nelle analisi sviluppate ad una determinata scala a fini di zonazione, le *terrain units* da adottare nel modello (TCUs) non sono necessariamente le stesse da utilizzare per la discretizzazione della carta di zonazione che deriva dal modello (TZUs). Un aspetto importante di tali unità è quello di definire in misura appropriata la loro dimensione, che deve necessariamente essere messa in relazione con la scala dell'analisi. L'area minima di una TCU dipende dalla risoluzione spaziale della carta, vale a dire la misura dell'area minima identificabile sulla carta come una unità separata discreta. L'area minima di una TZU è, viceversa, da mettere in relazione con la risoluzione perseguita per la zonazione.

Volendo mutuare questo concetto nell'analisi, su basi meccaniche, di problematiche quali quelle in discussione, vale a dire fenomeni franosi e subsidenza, si dovrebbe quindi preliminarmente procedere all'individuazione di areali omogenei da considerare tali con riferimento sia ai fenomeni che in esso hanno sede e sia alle caratteristiche salienti del territorio. All'interno di un areale siffatto si potrebbe, quindi, individuare un numero limitato di fenomenologie ritenute rappresentative, alle quali attribuire simbolicamente il significato di TRU/RAV (*Terrain Representative Unit / Representative Areal Volume*). I fenomeni in questione potrebbero, quindi, studiarsi con gli strumenti tipici della Geotecnica al fine di individuarne e oggettivarne, su basi quantitative, le caratteristiche salienti. Gli studi condotti potrebbero essere, a loro volta, utilizzati quali benchmark delle analisi statistiche e di quelle euristiche da condurre a piccola e media scala secondo i canoni illustrati nel capitolo 2 diventando, in tal modo, molto più oggettive grazie ad un numero limitato di studi di tipo ingegneristico.

In ogni caso, le analisi basate sulle TRU/RAV per fornire risultati significativi devono soddisfare una molteplicità di condizioni tra le quali le più importanti sono:

- una chiara definizione dell'area di studio, delle problematiche da approfondire e degli obiettivi da perseguire;

- una profonda sinergia tra approccio geotecnico ed approccio geologico;
- la disponibilità di una banca dati adeguata derivante da indagini in sito e di laboratorio;
- una chiara visione delle condizioni al contorno ed una padronanza degli strumenti di calcolo;
- un adeguato piano di controlli tra le previsioni in fase di studio ed il reale comportamento registrato in sito; etc.

Inoltre, le analisi in questione richiedono una scelta di fondo che riguarda la sequenza con la quale condurre gli studi e che può essere di carattere induttivo (*bottom-up*) o deduttivo (*top-down*) a secondo che si parta dalla grande scala per approdare progressivamente alla piccola scala o viceversa, come schematicamente indicato in figura 3.3.

Un tipico esempio di percorso induttivo (*bottom-up*) è fornito da COTECCHIA *et al.* [2014] per l'analisi, con un modello denominato MMLM (Multiscalar Methodology for Landslide Mitigation), della suscettibilità e pericolosità da frana su area vasta (Fig. 3.4) che viene condotta con le medesime conoscenze geo-idro-meccaniche usualmente richieste a scala di dettaglio. Come sottolineato dagli autori, il modello MMLM è basato sull'ipotesi che un numero limitato di assetti geo-idro-meccanici e di meccanismi di frana possano essere individuati in ambiti regionale di limitata estensione, come messo in luce in un'area pilota dell'Appennino Dauno nel sud dell'Italia (Fig. 3.4).

Un esempio di percorso deduttivo (*top-down*) è, a sua volta, descritto in CASCINI *et al.* [2015a] che, per le frane superficiali nei terreni di alterazione della Stretta di Catanzaro nella Regione Calabria, propongono lo schema riportato in figura 3.5 che si basa essenzialmente su tre differenti analisi rispettivamente svolte a piccola, media e grande scala. In particolare, a ognuna delle scale di analisi si individuano preliminarmente i fattori predisponenti la franosità che sono poi successivamente quantificati alla medesima scala di analisi. Per rendere la procedura intimamente coerente, l'output di ogni scala di analisi è assunto quale dato di input alla scala di maggiore dettaglio.

L'applicabilità dell'approccio proposto è discussa nei capitoli 4-5 nei quali si forniscono esempi pratici di analisi di frane e fenomeni di subsidenza che rientrano essenzialmente tra quelli affrontati in prima persona dall'autore

#### 4. Il caso di studio dei fenomeni franosi

La letteratura scientifica fornisce numerosi esempi di casi di studio ben documentati che possono essere proficuamente utilizzati per sostanziare il quadro di riferimento proposto nel precedente paragrafo che raggruppa gli approcci utilizzati in due macro categorie.

La prima include i metodi che generalizzano le conoscenze acquisite in aree di ridotte estensioni passando, secondo una logica di tipo induttivo (*bottom-up*), dalle scale maggiori a quelle di minore dettaglio che sono utilizzate per l'esame di aree di rilevante estensione. La seconda fa, viceversa, riferimento ai metodi che compiono il percorso inverso (*top-down*) secondo una logica di tipo deduttivo che, partendo dallo studio di aree vaste con metodi euristici, affina e quantifica le conoscenze acquisite in aree progressivamente più piccole nelle quali è possibile il ricorso ai metodi propri dell'Ingegneria.

Nel presente paragrafo per entrambi gli approcci sono forniti due casi di studio che rientrano prevalentemente nell'esperienza maturata dall'autore per rendere più agevole la trattazione di un tema complesso che, per essere sviluppato con rigore, richiede una profonda conoscenza di ogni singolo aspetto della ricerca alla quale si fa riferimento.

#### 4.1. Dalla scala di dettaglio alla piccola scala

I fenomeni franosi maggiormente diffusi sono, quasi ovunque, quelli a cinematica lenta. Un tipico esempio è rappresentato dal territorio italiano nel quale, in corrispondenza della quasi totalità di rilievi montuosi e collinari, sono presenti fenomeni che, nella schematizzazione geotecnica di LEROUËL *et al.* [1996], rientrano tra le frane attive che si rimobilizzano o si possono rimobilizzare nel corso della stagione piovosa, generalmente con spostamenti di ridotta entità. Per la loro diffusione sul territorio questi fenomeni possono, tuttavia, impedire in alcune realtà un uso avanzato del suolo. Molto più limitati sono, viceversa, le riattivazioni occasionali e i fenomeni di primo distacco, generalmente causati da eventi sismici o da altre cause innescanti quali, per esempio, eventi piovosi particolarmente critici e/o interventi antropici sul territorio [LEROUËL, 2001]. Per l'entità rilevante degli spostamenti, quest'ultimi causano spesso danni economici ingenti e distruzione di edifici ed infrastrutture.

In considerazione della rilevanza sia delle riattivazioni occasionali e sia dei fenomeni attivi/quiescenti, qui di seguito si riportano due casi di studio che evidenziano le modalità/possibilità di applicazione dell'approccio di tipo induttivo.

Il primo caso fa riferimento alla franosità che ha sede nei terreni di alterazione della Sila, ampiamente diffusi in Calabria, e ripercorre gli studi svolti dall'autore su un movimento franoso che, fin dall'inizio, presentò numerose difficoltà. Tra queste le più rilevanti apparivano la estrema eterogeneità dei terreni coinvolti nel movimento franoso e la totale assenza di spostamenti tra due successive riattivazioni occasionali temporalmente distanti tra loro. Difficoltà queste che resero necessaria la definizione di al-

cune procedure di carattere generale che trovarono successivamente una progressiva applicazione, prima, nello studio di altri fenomeni franosi e, successivamente, nella esportazione delle conoscenze su area vasta.

Il secondo caso fa tesoro dell'esperienza maturata da numerosissimi ricercatori nello studio dei fenomeni franosi a cinematica lenta per i quali la letteratura è ricca di indagini ed analisi di singoli eventi che forniscono preziosi dati sperimentali sulle grandezze che governano il cinematisimo di tali fenomeni. Partendo da questi dati l'autore mostra come sia possibile la messa a punto di un modello interpretativo degli spostamenti che è, quindi, utilizzato per prevedere l'evoluzione dei fenomeni oggetto di interesse con un ridotto numero di misure sperimentali.

#### 4.1.1. I TERRENI DI ALTERAZIONE DI SAN PIETRO IN GUARANO (CS)

Il movimento franoso che ha rappresentato il primo banco di prova per l'autore è riportato in figura 4.1a che indica, altresì, gli edifici danneggiati da una riattivazione occasionale del gennaio 1981 quando a valle di un periodo particolarmente piovoso e lungo si registrarono, nel corso di alcune ore, spostamenti dell'ordine di alcune decimetri. In una prima fase, gli spostamenti interessarono la porzione del pendio nella quale ricadono gli edifici 4A-4B, che risultarono inagibili a valle dell'evento, e successivamente fu coinvolta un'area dell'estensione complessiva di 2 ha all'interno della quale risultarono fortemente danneggiati gli edifici 6 e 7C e, con danni di minore entità, l'edificio 7A.

Come risulta evidente dalla figura 4.1a, la delimitazione visiva del movimento franoso non è immediata ed i motivi che la rendono tale sono numerosi. Tra questi, i prevalenti sono: l'intensa urbanizzazione dell'area di interesse; la ridotta entità degli spostamenti registrati nelle fasi parossistiche; la totale quiescenza del movimento a valle della precedente riattivazione occasionale occorsa nel 1931, vale a dire 50 anni prima dell'evento al quale si fa qui riferimento. È interessante osservare che le difficoltà alle quali si è appena fatto cenno diventavano sempre più manifeste nel corso dei sopralluoghi ai quali venivano sistematicamente invitati esperti del settore che, inevitabilmente, al termine della visita che contemplava anche una visione dal versante opposto, chiedevano lumi su dove fosse ubicato il movimento franoso.

Tali caratteristiche del fenomeno franoso, unitamente all'assenza di conoscenze geologiche-geotecniche sui terreni di alterazione presenti nel sottosuolo e sulla circolazione idrica sotterranea, resero necessarie numerose indagini che riguardarono anche l'evoluzione urbanistica dell'area, i danni registrati al suo interno nel corso del tempo ed il regi-

me delle piogge la cui valutazione fu resa possibile dalla presenza di un pluviometro installato nelle vicinanze nel 1923. Nel rinviare a GULLÀ e ANTRONICO [2003] per una descrizione puntuale del lavoro svolto, qui molto semplicemente si osserva che le indagini (Fig. 4.1b) si sono eseguite in tre differenti periodi e sono consistite nell'esecuzione di [CASCINI *et al.*, 2006b]: rilievo di dettaglio dei danni causati dalla riattivazione del 1981; 28 sondaggi con installazione di 11 piezometri a tubo aperto e 35 celle piezometriche tipo Casagrande (fino ad un massimo di tre lungo la medesima verticale). In laboratorio si sono, altresì, condotte prove di tipo convenzionale anche se in numero particolarmente elevato rispetto all'estensione dell'area di studio. I dati acquisiti sono stati sistematicamente utilizzati per svolgere analisi numeriche sia del regime di pressioni neutre e sia delle condizioni di stabilità del versante.

In estrema sintesi può dirsi che l'impegno maggiore è stato profuso per alcuni dei temi investigati e, in particolare, per quelli concernenti:

- inquadramento e classifica dei terreni sede del fenomeno franoso;
- caratterizzazione delle proprietà fisico-meccaniche dei terreni coinvolti;
- circolazione idrica sotterranea;
- modellazione del fenomeno franoso e della sua evoluzione nel tempo.

L'inquadramento e la classifica dei terreni erano rese particolarmente complesse dalla estrema eterogeneità dei litotipi presenti nell'area di interesse che non consentiva di ottenere sezioni stratigrafiche affidabili. Il problema in questione venne risolto attraverso l'introduzione di una classifica del grado di alterazione (Tab. II) che traeva spunto da una analogia classifica elaborata a Hong Kong (Geotechnical Control Office, 1984; 1988) per l'inquadramento di graniti e tufi alterati che ponevano in tale contesto geoambientale analoghe difficoltà di inquadramento. Un esempio dei risultati così ottenuti è rappresentato dalla sezione stratigrafica in figura 4.2 dalla quale si evince che, pur nella sua eterogeneità, il terreno coinvolto nel movimento franoso risulta essere esclusivamente quello appartenente alle classi V e VI, vale a dire quelle assimilabili a terreni sciolti, in contatto stratigrafico con il sottostante basamento a suo volta costituito da litotipi caratterizzati da un minore grado di alterazione (classi IV e III).

Una ricaduta immediata della classifica introdotta scaturì a valle delle prove di laboratorio che, inizialmente di difficile interpretazione, fornirono successivamente un quadro di insieme molto accurato delle proprietà fisico-meccaniche dei terreni investigati. In particolare, la figura 4.3 evidenzia con chiarezza che la coesione effettiva dei litotipi, al pari della loro granulometria, diminuisce all'aumentare del grado di alterazione. La figura 4.3 evidenzia, viceversa, che l'angolo di attrito si mantiene dello stesso or-

dine di grandezza dando origine a rette di rottura tra loro all'incirca parallele e, in ogni caso, caratterizzate da coefficienti di correlazione particolarmente elevati, del tutto utopistici prima dell'introduzione dell'inquadramento organico, ancorché semplificato, del grado di alterazione.

Per quanto riguarda la circolazione idrica sotterranea si deve, innanzitutto, sottolineare lo sforzo rilevante compiuto per la citata assenza di spostamenti tra due consecutive riattivazioni che, di fatto, non ha consentito di ottenere elementi di valutazione sulla evoluzione del pendio con i dati sperimentali acquisiti a valle dell'ultima riattivazione occasionale. Per superare questa difficoltà si utilizzarono, quindi, tre differenti modelli con i dati registrati al pluviometro installato nelle vicinanze nel 1923. Il primo modello a scatola chiusa di tipo idrologico mise in luce che la riattivazione dell'intero pendio era da mettere in relazione con una pioggia cumulata di 900-1000 mm su un periodo di 100-110 giorni consecutivi, caratterizzata da un periodo di ritorno di  $T = 40-50$  anni. Il secondo modello – ancora una volta di tipo statistico ed a scatola chiusa [CASCINI *et al.*, 1992] – correlò le piogge alle escursioni registrate in un piezometro considerato strategico. Una volta calibrato e validato il modello si utilizzò, quindi, per stimare con l'ausilio dei soli dati di pioggia le escursioni presumibilmente occorse in concomitanza della riattivazione occasionale del gennaio 1981.

I risultati così ottenuti (Fig. 4.4) incoraggiarono ad oggettivare le correlazioni tra piogge ed escursioni della falda con l'ausilio di modelli fisicamente basati in grado di descrivere il processo di infiltrazione nel sottosuolo delle acque meteoriche reso complesso sia dalle caratteristiche delle acque sotterranee nei terreni di alterazione e sia dalla mancanza, all'epoca degli studi, di una prassi consolidata sulla modellazione di falde caratterizzate da rilevanti escursioni nel periodo piovoso e, comunque, sempre con piano dei carichi a molti metri di profondità dal piano campagna.

Per quanto riguarda il primo aspetto si deve sottolineare che i piezometri installati e le sistematiche misure condotte per un lungo periodo di tempo [CASCINI e GULLÀ, 1990] misero in luce l'esistenza di due differenti falde localmente interconnesse. La prima, all'interno della coltre sede del movimento franoso, caratterizzata da rilevanti escursioni nel corso dell'anno che la portavano da una profondità di 15-20 m dal piano campagna nei mesi estivi ad una profondità di 5-10 m nei periodi piovosi. La seconda nel basamento ad andamento stazionario e quasi ovunque disconnessa dalla falda superficiale tranne in alcune porzioni del pendio (Fig. 4.2).

Per quanto riguarda la modellazione dei dati sperimentali, le caratteristiche della falda superficiale indussero a utilizzare, per la prima volta in Italia, un modello saturo-parzialmente saturo implementa-



to nel codice di calcolo SEEP/W [GEO-SLOPE, 2005]. Una volta calibrato e validato in periodi per i quali erano disponibili sia le misure piezometriche e sia le piogge, il modello fisicamente basato fu, quindi, implementato con i dati di pioggia antecedenti il gennaio del 1981 [CASCINI *et al.*, 2006b]. Un esempio di risultati conseguiti è riportato in figura 4.4 dalla quale si evince che il livello stimato in occasione della riattivazione del 1981 risulta innanzitutto congruente con quello fornito dal modello statistico e, al pari di questo, fornisce livelli di falda di poco superiori (circa 20 cm) rispetto a quelli misurati nell'intero periodo di osservazione che si è protratto per un numero rilevante di anni.

L'insieme dei dati acquisiti con le indagini, in sito e di laboratorio, e con la modellazione numerica furono, quindi, utilizzati per una semplice *back-analysis* con il metodo dell'equilibrio limite del fenomeno franoso. I risultati ottenuti hanno evidenziato che *i)* l'intera coltre risulta coinvolta nel fenomeno di più ampie dimensioni e che *ii)* il coefficiente di sicurezza assume un valore unitario solo per valori della resistenza residua ed in concomitanza dell'escursione stimata, per il gennaio 1981, con il modello fisicamente basato mentre tra due successive riattivazioni il suo valore è sistematicamente superiore all'unità.

È interessante osservare che un modello di evoluzione del versante messo a punto su basi esclusivamente geologiche e geomorfologiche [CASCINI *et al.*, 1994] arriva a conclusioni del tutto congruenti con il modello geotecnico in quanto stabilisce che il pendio è costituito da una coltre, di origine residuale e colluviale, che riempie un'antica concavità morfologica. L'evoluzione della coltre viene, quindi, messa in relazione a due importanti elementi strutturali di cui il primo rappresentato dall'elemento lungo il quale si sviluppava l'originaria concavità ed il secondo da quello presente al piede del pendio. Il primo è ritenuto un elemento di fondamentale importanza per comprendere la presenza e l'evoluzione della falda superficiale che risulta praticamente al contatto con il basamento nei periodi asciutti. Al secondo viene attribuito un ruolo di scalzamento al piede, a sua volta ritenuto rilevante nella evoluzione a lungo termine dell'intero pendio.

Le principali conclusioni alle quali si è pervenuti con le indagini e le modellazioni svolte sono state successivamente verificate nello studio di altri movimenti franosi apparentemente simili a quello in precedenza descritto e per i quali si sono svolte le indagini riportate nella tabella III che mette in luce come i sondaggi e la strumentazione installata, al pari delle indagini di laboratorio eseguite, siano andate progressivamente diminuendo fino a ridursi praticamente ad un numero molto contenuto come nel caso della frana di Costa Ceci. La tabella III evidenzia, altresì, che nel caso del secondo fenomeno franoso

studiato (via Vigne) si è provveduta ad installare una stazione tensiometrica, la prima in Italia per la misura delle pressioni neutre finalizzata all'analisi di un problema geotecnico. Installazione che ha, di fatto, confermato le ipotesi formulate in merito all'importante ruolo giocato sulle acque sotterranee dalla zona parzialmente satura presente tra il piano campagna e il pelo libero delle falde sospese (Fig. 4.2).

Gli studi le cui indagini sono illustrate in tabella III hanno, altresì, confermato in pieno tutti i complessi meccanismi messi in luce nell'analisi del primo fenomeno di instabilità, vale a dire il coinvolgimento nei fenomeni dell'intera coltre di degradazione, la formazione di falde sospese nei periodi piovosi localmente influenzate da immissioni concentrate di acqua dal basamento, la loro mobilitazione in concomitanza di piogge cumulate con periodi di ritorno elevati, la totale quiescenza tra una riattivazione e la successiva.

Il progressivo approfondimento delle conoscenze su singoli fenomeni franosi con indagini via via più contenute e, soprattutto, la progressiva conferma dei fattori predisponenti e delle cause innescanti la franosità nei terreni di alterazione indusse a verificare la possibilità di caratterizzarne gli aspetti salienti su area vasta e ad una scala topografica di minore dettaglio. In tale ottica, con riferimento all'area in figura 4.5, la carta dei fenomeni franosi e delle concavità morfologiche a scala 1:5.000 fu sovrapposta alla carta del grado di alterazione degli gneiss, redatta utilizzando i criteri in precedenza esposti. È interessante osservare che questa semplice operazione evidenzia caratteristiche morfometriche completamente differenti dei fenomeni che hanno sede nei litotipi assimilabili a terreni sciolti (classi V e VI) e di quelli che si manifestano in litotipi assimilabili a rocce tenere (III e IV).

Restringendo l'attenzione ai fenomeni di instabilità ricadenti nelle classi V e VI, vale a dire quelle nelle quali hanno sede le frane in precedenza illustrate, si elaborò la cartografia tematica illustrata in figura 4.6 che riporta il reticolo idrografico dell'area di interesse unitamente alle principali strutture tettoniche presenti al suo interno. È interessante osservare che, così operando, l'86% circa dei fenomeni franosi risulta interessato da una struttura tettonica al piede o lungo l'asse longitudinale; circostanza questa che conferma sebbene solo qualitativamente il ruolo giocato dalle acque sotterranee e dai fenomeni erosivi sulla evoluzione dei versanti. Se a ciò si aggiunge che nel database disponibile le riattivazioni occasionali risultano sempre causate da piogge cumulate su alcuni mesi, si deduce che le cause innescanti i fenomeni studiati in dettaglio possono ritenersi generalizzabili all'intera famiglia di frane cartografate nell'area di studio.

Conclusioni queste che, pur richiedendo una costante e puntuale verifica nel corso del tempo, ren-

dono possibili una migliore pianificazione territoriale dell'area di interesse e, nel contempo, lasciano intravedere la possibilità concreta di prevedere le fasi parossistiche dei fenomeni franosi con l'ausilio di un numero ridottissimo di piezometri Casagrande (1-2), da posizionare al contatto tra coltre di alterazione e sottostante basamento. Obiettivi entrambi perseguibili con sforzi ed impegni incomparabilmente inferiori rispetto a quelli profusi nel corso degli anni per l'analisi dei casi di studio in precedenza discussi.

#### 4.1.2. LE FRANE A CINEMATICA LENTA

La diffusione, in molti contesti geo-ambientali, di fenomeni franosi a cinematica lenta che si mobilitano nel corso della stagione delle piogge ha da molto tempo attratto l'interesse degli studiosi di tutto il mondo che hanno svolto sull'argomento ricerche particolarmente approfondite. È, quindi, presente nella letteratura scientifica un numero significativo di lavori a stampa che, con riferimento ai fenomeni caratterizzati da una superficie di scorrimento mediamente profonda (> 5-10 m), possono a grandi linee farsi rientrare in due distinte categorie.

Rientrano nella prima categoria gli studi che analizzano i singoli fenomeni con un approccio fisicamente basato finalizzato ad analizzare gli aspetti meccanici che presidono sia alle modifiche del regime idrico sotterraneo sia agli spostamenti che si registrano nel corso dell'anno (VULLIET e HUTTER, 1988; ANGELI *et al.*, 1996; MANDOLINI e URCIUOLI, 1999; COROMINAS *et al.*, 2005; MAUGERI *et al.*, 2006; VAN ASCH *et al.*, 2007; CASCINI *et al.*, 2010a; tra gli altri). Fanno parte della seconda i tentativi che, partendo dai dati disponibili, cercano di generalizzare l'andamento degli spostamenti per prevederne l'evoluzione nel tempo con un approccio essenzialmente a scatola chiusa (BHANDARI, 1988; PETLEY *et al.*, 2002, 2005; CASCINI *et al.*, 2014a; tra gli altri).

È opinione dell'autore che l'enorme impegno sin qui profuso su singoli casi di studio porterà in tempi brevi, grazie all'approccio di tipo induttivo che è finalizzato a generalizzare le conoscenze acquisite a scala di dettaglio, a saldare i due filoni di ricerca. Un tentativo in tale direzione è qui di seguito riportato facendo riferimento alla frana di Porta Cassia e a un modello di interpretazione degli spostamenti proposto nella letteratura.

#### Il caso di studio di Porta Cassia (Orvieto)

La frana in discussione ha sede sul versante Nord della formazione argillosa sovraconsolidata che borda la placca tufacea sulla quale sorge la città di Orvieto (Fig. 4.7). Nel passato, il fenomeno è stato investigato a fondo da molti autori (VINASSA DE REGNY, 1904; VINASSA DE REGNY, 1905; LEMBO-FAZIO *et al.*, 1984; TOMMASI *et al.*, 1986; PANE e MARTINI, 1996; TOMMASI *et al.*, 2006; CALVELLO *et al.*, 2009; CASCINI *et al.*, 2010a; tra gli

altri) che hanno approfondito: la stratigrafia del versante, le proprietà dei terreni presenti nel sottosuolo, il regime delle acque sotterranee, l'andamento degli spostamenti superficiali e profondi. Nel rimandare ai lavori scientifici citati per gli approfondimenti ritenuti necessari, la figura 4.7 fornisce una visione sintetica dei sondaggi eseguiti nell'area di interesse e della strumentazione installata nel corso delle tre campagne di indagine rispettivamente eseguite nel 1982, 1996 e 1998.

I dati di letteratura hanno rappresentato la base di partenza degli studi svolti da CASCINI *et al.* [2010a] per la modellazione delle acque sotterranee e da CALVELLO *et al.* [2009] per la definizione degli scenari degli spostamenti registrati nel corso dell'anno. Tali dati evidenziano, innanzitutto, la possibilità di schematizzare il sottosuolo con due differenti litotipi, il primo superficiale sede del fenomeno franoso ed il secondo rappresentato dal sottostante basamento, separati da uno strato relativamente sottile di argilla destrutturata. In entrambe le formazioni si osserva un'intensa circolazione idrica sotterranea ad andamento stagionale e di carattere transitorio nel litotipo superficiale e a carattere stazionario nel sottostante basamento. Infine, gli spostamenti registrati nella coltre superficiale evidenziano con chiarezza sia la presenza di più meccanismi lungo il pendio e sia un differente andamento degli stessi nella stagione asciutta ed in quella delle piogge, nel corso delle quali i valori cumulati non hanno mai superato i 6 cm/anno nel periodo di osservazione che si è esteso dal 1987 al 2003.

La modellazione delle acque sotterranee è stata sviluppata con il codice di calcolo commerciale SEEP/W [GEO-SLOPE, 2005] che è stato preventivamente calibrato e validato lungo alcune verticali del pendio (Fig. 4.8). Una volta verificata la sua elevata affidabilità nelle sezioni di controllo, il codice di calcolo è stato utilizzato per stimare le pressioni neutre in qualunque punto del pendio, anche laddove non si disponeva di misure in sito. I dati così ottenuti sono stati, quindi, assunti a riferimento da CALVELLO *et al.* [2009] che hanno calibrato un modello fenomenologico monodimensionale in grado di legare, secondo la relazione proposta VULLIET e HUTTER [1988], la velocità di spostamento in un punto del pendio al valore assunto in quel punto dal coefficiente di sicurezza locale. Alcune delle fasi di calibrazione e validazione del modello utilizzato sono illustrate in figura 4.9 che mette in luce sia la sua capacità di cogliere gli andamenti degli spostamenti nella stagione asciutta e in quella delle piogge e sia la grande accuratezza dei risultati numerici che, di fatto, quasi coincidono con le misure sperimentali. Una volta validato, il modello è stato utilizzato per prevedere gli spostamenti del pendio in funzione di differenti scenari di pioggia, alcuni dei quali caratterizzati da periodi di ritorno superiori a  $T = 200$  anni.

È interessante osservare come i dati così acquisiti abbiano indotto CALVELLO *et al.* [2009] a sottolineare

che gli spostamenti dell'ordine di tre metri [TOMMASI *et al.*, 1997] registrati all'inizio del 1900 al piede del pendio [VINASSA DE REGNY, 1904] non possono essere attribuiti ad eventi pluviometrici critici quanto piuttosto ad una riattivazione occasionale, con molta probabilità causata dalla realizzazione, alcuni anni prima, di un'importante infrastruttura viaria ubicata proprio al piede del pendio.

### Un modello interpretativo degli spostamenti

Studi quale quello appena illustrato lasciano intravedere la concreta possibilità di individuare correlazioni di carattere generale tra piogge, principale causa innescante i fenomeni a cinematica lenta, regime delle pressioni neutre, che dalle piogge è fortemente influenzato, e spostamenti il cui andamento è, a sua volta, intimamente connesso con le pressioni neutre. Si deve, tuttavia, osservare che tale obiettivo, perseguito da molti, è ben lungi dall'essere raggiunto per una molteplicità di motivi tra i quali uno dei più rilevanti è rappresentato, allo stato attuale, dall'apparente drastica differenza degli spostamenti registrati in molteplici casi di studio presenti nella letteratura scientifica, di cui alcuni esempi sono riportati in figura 4.10.

Un interessante passo in avanti in tale direzione è stato recentemente compiuto da CASCINI *et al.* [2014a] che hanno proposto un modello fenomenologico interpretativo dei fenomeni di instabilità nei terreni a grana fine. Per i casi di studio in figura 4.11a il modello in questione individua, infatti, tre andamenti tipici degli spostamenti rispettivamente denominati di tipo I, II e III (Fig. 4.11b) che scaturiscono dalla normalizzazione degli spostamenti attraverso le variabili  $D(t)$  e  $T(t)$  e l'equazione di tipo esponenziale come qui di seguito definite:

$$D_i(t_j) = \frac{d(t_j) - d_{min,i}}{d_{max,i} - d_{min,i}} \quad (4.1)$$

$$T_i(t_j) = \frac{t_j - t_{min,i}}{t_{max,i} - t_{min,i}} \quad (4.2)$$

$$D_i(t_j) = T_i(t_j)^x \quad (4.3)$$

dove:  $d(t_j)$  è lo spostamento cumulato al tempo  $t_j$ ;  $D_i(t_j)$  è lo spostamento cumulato normalizzato al tempo  $t_j$  per la fase attiva  $i$ ;  $d_{min,i}$  e  $d_{max,i}$  sono gli spostamenti cumulati all'inizio e alla fine della fase attiva  $i$ ;  $T_i(t_j)$  è il tempo normalizzato adimensionale al tempo  $t_j$  per la fase attiva  $i$ ;  $t_{min,i}$  e  $t_{max,i}$  sono i tempi all'inizio ed alla fine della fase attiva  $i$ ;  $x=1$  per l'andamento-tipo I,  $x < 1$  per l'andamento-tipo II, e  $x > 1$  per l'andamento-tipo III.

CASCINI *et al.* [2014a] osservano che l'andamento-tipo I è quello caratteristico dei periodi asciutti quando, verosimilmente, lo stato tensionale è co-

stante e gli spostamenti sono assimilabili a fenomeni tipo *creep*. L'andamento-tipo II è, a sua volta, quello che si osserva nei periodi piovosi ed è, quindi, da mettere in relazione con gli eventi pluviometrici. Infine, l'andamento-tipo III appare quello tipico delle riattivazioni occasionali, per le quali le cause innescanti e i fenomeni che governano l'andamento degli spostamenti sono significativamente differenti dai precedenti.

Il modello proposto da CASCINI *et al.* [2014a] richiede naturalmente ulteriori conferme della sua validità, prima di una sua applicazione generalizzata anche se, fin d'ora, ne appaiono evidenti le potenzialità - sia per la previsione degli spostamenti di un singolo pendio e sia di un numero rilevante di frane che hanno sede in aree di rilevante estensione - come qui di seguito brevemente discusso.

### Dal modello interpretativo alla previsione degli spostamenti

La possibilità di prevedere gli spostamenti è stata investigata facendo riferimento ad uno degli eventi più accuratamente documentati in letteratura, vale a dire la frana di Vallcebre [COROMINAS *et al.*, 2005], per la quale si dispone di misure in continuo a partire dal 1996, che mostrano come gli spostamenti registrati nella stagione delle piogge siano quelli dell'andamento-tipo II (Fig. 4.12). Partendo da questa osservazione e con l'obiettivo di prevedere gli spostamenti sulla base di un numero ridotto di misure effettuate all'inizio della fase attiva, CASCINI *et al.* [2014a] hanno implementato un modello che utilizza  $D_{t_{ref}}$  e  $M$ , come dati di input, ed è basato sulle equazioni:

$$D(t) = d_1 + \Delta t_{ref} M \left[ \left( \frac{t - t_1}{\Delta t_{ref}} + 1 \right)^{\frac{v_{max}}{M}} - 1 \right] \quad (4.4)$$

$$V(t) = v_{max} \left( \frac{t - t_1}{\Delta t_{ref}} + 1 \right)^{\frac{v_{max}}{M} - 1} \quad (4.5)$$

$$E_d = \frac{RMSE(d)}{d_{max} - d_1} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (d(t_k) - \underline{d}(t_k))^2}{N}}}{d_{max} - d_1} \quad (4.6)$$

$$E_v = \frac{RMSE(v)}{v_{max}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (v(t_k) - \underline{v}(t_k))^2}{N}}}{v_{max}} \quad (4.7)$$

$$E_{tot} = E_d - E_v \quad (4.8)$$

dove:  $v_{max}$  è la velocità misurata quando  $T$  assume valore unitario;  $d_1 = d(v_{max})$  è lo spostamento misurato quando  $T$  assume valore unitario;  $t_1 = t(v_{max})$  è il tempo misurato quando  $T$  assume valore unitario;  $E_d$  è l'errore adimensionale sugli spostamenti;  $d_{max}$  è lo spostamento calcolato finale;  $d(t_k)$  è lo sposta-

mento calcolato al tempo  $t_k$ ;  $\underline{d}(t_k)$  è lo spostamento misurato al tempo  $t_k$ ;  $N$  è il numero di osservazioni;  $E_v$  è l'errore adimensionale sulle velocità;  $v(t_k)$  è la velocità calcolata al tempo  $t_k$ ;  $\underline{v}(t_k)$  è la velocità misurata al tempo  $t_k$ ;  $E_{tot}$  è l'errore adimensionale totale.

I risultati che così si ottengono (Fig. 4.13) indicano che il comportamento cinematico del fenomeno può essere previsto con un numero particolarmente limitato di osservazioni, da 5 a 7, acquisite durante la fase iniziale degli spostamenti. Circostanza questa che incoraggia a verificare ulteriormente le potenzialità del modello e, nel contempo, a investigarne la sua applicabilità su area vasta utilizzando come dati di input le misure satellitari elaborate con la tecnica DInSAR (v. Cap.6) attualmente già utilizzabili per definire lo stato di attività dei fenomeni franosi a cinematica lenta e per localizzare gli edifici da essi danneggiati [CASCINI *et al.*, 2013c]. È indubbio, infatti, che laddove quest'ulteriore innovazione tecnologica, nel senso discusso in [MANDOLINI e MANASERO, 2011], si rivelasse affidabile ne conseguirebbe un significativo miglioramento della pianificazione territoriale e dell'uso del suolo con evidenti ricadute positive in termini di gestione globale del territorio.

#### 4.2. Dalla piccola alla scala di dettaglio

Un'altra classe di fenomeni ampiamente diffusa in molte parti del mondo è rappresentata dalle frane superficiali che coinvolgono, arealmente e volumetricamente, porzioni limitate di terreno ma che possono manifestarsi, nel corso di un unico evento, in aree di rilevante estensione. I fenomeni in questione possono coinvolgere sia i terreni granulari (Fig. 4.14a) e sia quelli a grana fine (Fig. 4.14b) causando conseguenze estremamente variabili in funzione dei litotipi coinvolti.

Nei terreni a grana grossa, laddove collassabili, si può assistere a fenomeni di liquefazione statica nelle aree sede dei fenomeni di primo distacco con conseguente evoluzione rapida verso valle delle masse in stabilizzate dove si possono registrare vittime ed ingenti danni economici. Nel secondo caso, viceversa, il passaggio dai fenomeni di innesco alla completa dislocazione delle masse instabili può richiedere un periodo di tempo lungo, anche dell'ordine di molti anni; ne consegue che i danni prevalenti sono quelli legati alla proprietà anche se, talora, di rilevante entità [CROZIER, 2005]. Nel seguito si introducono due casi di studio che delineano le modalità con le quali si sono analizzati i fenomeni appartenenti alle classi così definite, entrambi con un approccio di tipo deduttivo la cui scelta è, comunque, scaturita da considerazioni molto diverse tra loro.

Nel caso delle coltri piroclastiche della Campania (1° caso), la scelta dell'approccio deduttivo (*top-down*) è stata resa ineludibile da oggettive necessità

in quanto le Autorità competenti in materia di gestione del territorio, forti dell'esperienza positiva maturata nel corso della gestione di una grave emergenza nella Regione Campania [CASCINI, 2004; CASCINI, 2005], avevano richiesto alle Comunità tecnica e scientifica di sviluppare rapidamente studi su area vasta finalizzati alla individuazione di un livello preliminare della zonazione del rischio [CASCINI, 2003]. Richiesta che fu, a suo tempo, formulata a valle di atti ufficiali emanati dal Governo centrale che fissava tempi particolarmente ristretti per dare seguito a ben determinati adempimenti nonostante l'assenza di procedure standardizzate a livello nazionale ed internazionale.

Viceversa, per i terreni di alterazione della Stretta di Catanzaro (2° caso), la scelta dell'approccio deduttivo (*top-down*) ha rappresentato una sfida scientifica lanciata per vari motivi. Innanzitutto, l'esperienza maturata nel corso degli anni precedenti sui fenomeni franosi superficiali della Campania che dimostravano la possibilità concreta di arrivare a risultati significativi ed affidabili a tutte le scale topografiche di interesse, pur partendo dalla piccola scala e con approcci di tipo euristico. Il desiderio di confermare l'esistenza, per alcune problematiche, di una valida alternativa all'approccio classico e molto più consolidato di tipo induttivo (*bottom-up*) ma che, come in precedenza discusso, può richiedere tempi lunghi di gestazione, sicuramente poco compatibili con quelli di carattere gestionale. Infine, la sensazione all'epoca non provata, e ancora non dimostrabile, delle maggiori difficoltà che il ricorso all'approccio induttivo può comportare per una tematica nella quale la probabilità di non raggiungere l'obiettivo, laddove si parta dal singolo dettaglio, appare e continua ad apparire particolarmente elevata.

##### 4.2.1. I FENOMENI DI INSTABILITÀ NELLE PIROCLASTITI DELLA CAMPANIA

Questo primo caso di studio trae origine dagli eventi di colate rapide di fango che, nel maggio del 1998, funestarono cinque Comuni della Regione Campania (Fig. 4.15). Gli aspetti salienti dei fenomeni occorsi, le modalità di gestione dell'emergenza e le ricerche successivamente sviluppate sono descritte in numerosi contributi a stampa [CASCINI, 2004; 2005; 2014]. Qui si vuole semplicemente ricordare che il Dipartimento di Protezione Civile Nazionale chiese la perimetrazione delle aree a rischio residuo di colate rapide di fango in soli 11 giorni a partire dalla data dell'evento e tale richiesta perentoria rese indispensabili il ricorso a metodi di tipo euristico (Fig. 4.16) e una zonazione di tipo preliminare.

In considerazione della pronta risposta fornita dalla Comunità scientifica e di quella tecnica, immediatamente a valle della presentazione della zonazione in figura 4.15, il Governo centrale emanò il

D.L. 180/98 che imponeva alle Autorità competenti in materia di gestione del rischio da frana di individuare, nei territori di propria competenza e ad una scala adeguata (almeno 1:25.000), le aree a rischio molto elevato per la vita umana essendo al loro interno alta la probabilità che si potessero verificare numerose vittime a seguito di eventi franosi di rilevante intensità.

Le attività sviluppate in un'area di circa 17.000 km<sup>2</sup> (Fig. 4.17), in osservanza a questo dettato legislativo, sono descritte in CASCINI [2005] e si sono basate sul diagramma di flusso del tutto simile a quello riportato in figura 4.16 per una molteplicità di motivi tra i quali i tempi ristretti ancora una volta fissati dal Governo centrale e la complessità delle problematiche da affrontare, rese tali dalle fenomenologie oggetto di studio e dall'estensione dell'area da investigare.

Un merito rilevante della zonazione sviluppata è rappresentato dall'individuazione degli areali ad alto rischio per la vita umana e la proprietà che ha consentito sia la messa a punto di sistemi di allarme e sia una migliore pianificazione territoriale inibendo nuove costruzioni nelle aree a rischio ed in quelle classificate a pericolo elevato. Al contrario, un limite della zonazione è rappresentato dall'impossibilità di effettuare una graduatoria di queste aree e di distinguere le fenomenologie che in essi hanno sede. Ne consegue la pratica impossibilità di pianificare e progettare interventi strutturali di mitigazione del rischio che sono attualmente possibili in pochissime realtà – come, per esempio, nel caso di Nocera Inferiore [FERLISI *et al.*, 2015; LINNERTH-BAYER *et al.*, 2015] e di Cervinara [CASCINI *et al.*, 2011a; CUOMO *et al.*, 2014] – all'interno delle quali si sono condotte indagini e studi di estremo dettaglio che consentono l'uso dei modelli ingegneristici a scala grande (1:5.000) e di dettaglio (1:2.000).

Considerando che analoghe indagini e studi non possono essere condotte negli altri 210 Comuni classificati ad alto rischio, l'Autore ha verificato la possibilità di dare una risposta ai quesiti in precedenza formulati partendo dalla piccola scala (1:100.000) e, in particolare, da una carta geologica del basamento sottostante le coltri piroclastiche e dalle curve F-N che descrivono la frequenza cumulata (F) di un evento che può causare N o più vittime [CASCINI *et al.*, 2008d]. È appena il caso di ricordare che entrambi i tematismi sono risultati di facile realizzazione per i dati presenti in letteratura sia sulla geologia della Campania e sia sugli eventi occorsi nel passato la cui interpretazione, in termini di fenomenologie e di conseguenze, risulta particolarmente affidabile a partire dal XVII secolo [CASCINI e FERLISI, 2003].

La figura 4.18 evidenzia che i fenomeni di maggiore intensità ai quali sono associate le conseguenze più rilevanti sono quelli nei quali il basamento è costituito da rocce carbonatiche fratturate (contesto

A1 in CASCINI *et al.*, 2014c), in larga misura presenti nella provincia di Salerno. Tale circostanza è legata a molteplici fattori tra i quali i più rilevanti sono le condizioni al contorno e le piogge che in questo contesto hanno sede. Il ruolo delle condizioni al contorno è ampiamente discusso in Cascini *et al.* [2008; 2010b; 2011a] ed è confermato dagli eventi occorsi nel maggio 1998 [CASCINI *et al.*, 2008a] quando, al termine della stagione delle piogge, eventi pluviometrici su più giorni diedero luogo ad una progressiva saturazione dei terreni che, nel corso dell'evento finale, fu favorita anche da immissioni concentrate di acqua dal sottostante basamento calcareo nelle sovrastanti coltri piroclastiche [CASCINI *et al.*, 2011a]. Per quanto riguarda le piogge, è interessante osservare che i monti Lattari rappresentano un'importante barriera orografica [CASCINI *et al.*, 2014c] che, in alcuni periodi dell'anno, può essere una delle concause di piogge particolarmente critiche quali quelle occorse nel 1954 quando si registrarono più 504 mm di pioggia in 16 ore dopo 9 giorni caratterizzati da assenza di precipitazioni meteoriche [TRANFAGLIA e BRACA, 2004]. Considerando la bassa saturazione dei terreni all'inizio della stagione delle piogge, questi eventi di eccezionale intensità provocarono essenzialmente una erosione diffusa lungo i versanti che fu successivamente alla base di fenomeni di flusso di rilevante magnitudo [CASCINI *et al.* 2014c].

In definitiva, si può osservare che le analisi svolte a piccola scala hanno consentito di effettuare una graduatoria dei comuni attualmente classificati ad un medesimo livello di rischio ed hanno, nel contempo, consentito di acquisire elementi di giudizio sul ruolo giocato dalle condizioni al contorno come discusso in CASCINI *et al.* [2014c] che mettono tra loro in relazione le piogge, i valori di suzione e le tipologie di instabilità che possono avere sede laddove è presente il complesso carbonatico (Tab. IV). Nel Periodo 1 si verificano prevalentemente fenomeni erosivi che tipicamente concorrono all'insorgere di flussi iperconcentrati. Il Periodo 3 si contraddistingue per l'innescò di fenomeni franosi di primo distacco che evolvono in colate di fango e/o valanghe di detrito. Nel Periodo 2 possono manifestarsi entrambe le fenomenologie innanzi citate mentre nel periodo 4 possono verificarsi fenomeni localizzati di erosione e di primo distacco che coinvolgono modesti volumi di materiale solido.

Ulteriori significative differenze possono riguardare i fenomeni di instabilità nel corso di un singolo evento, come nel caso del maggio 1998 quando sei meccanismi furono riconosciuti, a scala intermedia e grande (1:25.000-1:5.000), nelle zone di innescò dei fenomeni di primo distacco (Fig. 4.19). Tra questi i più comuni sono risultate le frane multiple occorse nelle concavità morfologiche sepolte (M1) e le valanghe di detrito lungo i versanti aperti (M2) [CASCINI *et al.*, 2008a]. Per il meccanismo M1 CASCINI

*et al.* [2011a] hanno sviluppato una analisi sulla loro distribuzione spazio-temporale verificando la sussistenza di una stretta correlazione tra le condizioni idrauliche al contorno a scala di pendio e l'assetto strutturale dell'intero massiccio (Pizzo d'Alvano) sul quale le fenomenologie hanno avuto sede.

Una conoscenza adeguata di tutti i fattori in precedenza elencati – meccanismi, condizioni al contorno, piogge critiche etc. – ha rappresentato il punto di partenza per passare dai metodi euristici a quelli deterministici che, a grande scala (1:5.000), richiedono una preliminare calibrazione prima di un loro uso diffuso secondo quanto discusso nel capitolo 3. L'importanza della fase di calibrazione è dettagliatamente discussa in [SORBINO *et al.*, 2010] che, con l'ausilio di due indici rispettivamente denominati "Indice di successo" (SI) ed "Indice di errore" (EI), mettono in luce la differente capacità di TRIGRS [BAUM *et al.*, 2002] e TRIGRS-unsaturated [SAVAGE *et al.*, 2004] di cogliere i sei meccanismi in precedenza citati (Fig. 4.20). SI rappresenta, in percentuale, la porzione areale di un'assegnata zona di innesco dei fenomeni franosi valutata come instabile dal modello; EI individua il rapporto, in percentuale, tra le aree computate come instabili al di fuori delle zone di innesco e la porzione areale di un assegnato bacino non affetta da fenomeni di primo distacco. I risultati ottenuti rafforzano ulteriormente la necessità di ricorrere a metodi avanzati laddove si vogliono analizzare a scala di dettaglio (1:2.000) i complessi fattori alla base delle instabilità.

Significativi esempi in tal senso sono illustrati in CASCINI *et al.* [2008b; 2010b; 2013a] che per i meccanismi M1, M2 ed M3 sviluppano analisi particolarmente avanzate con l'ausilio delle condizioni al contorno ed iniziali derivanti dalle analisi in precedenza illustrate, svolte a scale più piccole. In particolare, la figura 4.21a mostra la capacità di un modello 3D accoppiato di riprodurre il meccanismo M1 [CASCINI *et al.*, 2010b] mentre la figura 4.21b illustra il raggiungimento di deformazioni plastiche in un'area a forma triangolare a seguito dell'impatto di un volume limitato di terreno secondo quanto messo in luce dal meccanismo M2 [CASCINI *et al.*, 2013a]. Infine, la figura 4.21c mette in relazione il coefficiente di sicurezza ed alcuni fattori che condizionano il meccanismo M3 quali, per esempio, il ruscellamento superficiale, le condizioni stratigrafiche locali, ecc. [CASCINI *et al.*, 2008b].

Appare interessante osservare che le analisi a scala di pendio possono e devono essere sviluppate, in alcuni casi, con l'ausilio di modelli e proprietà dei terreni particolarmente avanzate per comprendere meccanismi complessi non riconoscibili con i metodi usualmente adottati. È questo, per esempio, il caso di un pendio sede di differenti moti di filtrazione per il quale il metodo dell'equilibrio limite fornisce un coefficiente di sicurezza di gran lunga superio-

re all'unità per linee di flusso verticali (Fig. 4.22a), mentre una analisi tensio-deformativa accoppiata mostra anche in questa condizione la possibilità di significativi incrementi di tensione con conseguenti fenomeni di collasso (Fig. 4.22b). Risultato questo particolarmente rilevante nell'analisi della suscettibilità dei pendii a fenomeni di primo distacco che potrebbe essere erroneamente valutata in alcune circostanze dai metodi tradizionali.

Un altro esempio significativo scaturisce dall'analisi della propagazione di fenomeni tipo flusso che richiede l'uso di modelli numerici avanzati e di dati di input adeguati sulla reologia dei materiali coinvolti come mostrato in figura 4.23 che riporta alcuni dati di una *back-analysis* del drammatico evento che nel luglio 2006 avvenne in un piccolo comune delle Dolomiti. In particolare, nel corso di poche ore numerosi *debris flows* di notevole volume si verificarono all'interno di un bacino montano mentre al termine di questa sequenza occorre un *flash flood* di ridotto volume che causò due vittime. In questa circostanza l'analisi numerica mette in luce la capacità della vasca di accumulo ubicata a valle di trattenere i *debris flows* (Fig. 4.23a) mentre risulta del tutto inadeguata per trattenere il *flash flood* (Fig. 4.23b) nonostante il suo ridotto volume [CASCINI *et al.*, 2015b]. Tale risultato indica con chiarezza l'assoluta necessità di progettare le opere passive di mitigazione del rischio portando in conto le caratteristiche del flusso che possono essere notevolmente differenti nel caso di corrente lenta o veloce.

#### 4.2.2. LE FRANE SUPERFICIALI NELLA STRETTA DI CATANZARO

Il caso di studio che si illustra nel presente paragrafo riguarda le frane superficiali nei litotipi a grana fine della Stretta di Catanzaro che sono ampiamente diffusi su un gran numero di versanti e hanno dimensioni particolarmente ridotte (Fig. 4.24). Infatti, la larghezza non è superiore ai 20 m e la lunghezza varia da un minimo di 10 m ad un massimo di 100 m. La profondità è, a sua volta, particolarmente contenuta in quanto la franosità si sviluppa esclusivamente nella porzione superficiale alterata della sottostante formazione di base il cui spessore è generalmente compreso nell'intervallo 0.5-3.0 m (Fig. 4.24).

Una classifica dei fenomeni in discussione, che in accordo con VARNES [1978] possono essere definiti *shallow earth slides* o *earth slides - earth flows*, è resa complessa nella Stretta di Catanzaro – così come in molti altri contesti – dalla molteplicità di forme che si osservano sui versanti e dalle modalità di evoluzione dei fenomeni di instabilità. Ne consegue l'assenza quasi sistematica di carte inventario significative di questi fenomeni come nel caso oggetto di studio per il quale l'Autorità di Bacino della Calabria li individua e classifica, a scala 1:10.000, semplicemente come frane superficiali o aree in erosione.

Partendo dalla carta inventario dei fenomeni franosi, lo studio si è posto, quindi, l'obiettivo di mettere a punto uno strumento robusto di previsione e prevenzione di questa tipologia di frane che, in alcuni contesti, assume una assoluta rilevanza dal punto di vista economico [CROZIER, 2005]. Questo obiettivo è stato perseguito individuando, a scala piccola e media, le aree ed i versanti sede o potenzialmente sede di questa tipologia di fenomeni mentre a scala grande e di dettaglio la loro localizzazione ed evoluzione sui versanti è stata analizzata con i metodi deterministici. Rimandando a CASCINI *et al.* [2015a] e CIURLEO [2012] per tutti gli approfondimenti ritenuti necessari, qui si dirà semplicemente che, in accordo con FELL *et al.* [2008a; 2008b], si sono usati i metodi euristici, statistici e deterministici rispettivamente a piccola, media e grande scala. Naturalmente, passando dalla piccola alla grande scala si è fatto riferimento ad aree progressivamente più piccole utilizzando, per verificare la consistenza della procedura adottata, i dati di output della scala più piccola come dati di input di quella più grande.

In particolare, a piccola scala (1:100.000), si è fatto riferimento ad un'area di 2.000 km<sup>2</sup>, ubicata nelle province di Catanzaro e Crotona (Fig. 4.25). Quest'area è stata analizzata assumendo la semplice ipotesi che le frane fossero associate alla naturale evoluzione geomorfologia dei versanti e non casualmente distribuite sul territorio. In tale ottica si sono svolti molteplici tentativi per individuare la sussistenza o meno di relazioni tra i fattori geologici dell'area (geologia, geomorfologia, tettonica, etc.) e tutti i fenomeni cartografati nella carta inventario dell'Autorità di Bacino. I risultati che così si sono ottenuti evidenziano la sussistenza di una stretta interazione tra il numero di frane per km<sup>2</sup> (densità spaziale delle frane) e almeno tre fattori predisponenti la franosità rispettivamente rappresentati dalla litologia, velocità di sollevamento dell'area [SORRISO-VALVO e TANSI, 1996] e reticolo idrografico superficiale (Fig. 4.25).

Osservando che le medesime correlazioni esistono tra le frane superficiali e i fattori predisponenti la franosità in precedenza citati, si è arrivati alla conclusione che quest'ultimi possono avere sede prevalentemente soltanto in una piccola porzione dell'area investigata a piccola scala. Pertanto, a media scala (1:25.000), l'attenzione è stata rivolta alla zonazione della suscettibilità da frane superficiali. A questo fine si è investigata un'area dell'estensione di 150 km<sup>2</sup> che rappresenta il 7,5% di quella inizialmente investigata (Fig. 4.26).

All'interno dell'area così definita si sono svolte analisi statistiche bivariate tramite il metodo "information value" [YIN e YAN, 1988] che è basato sulla valutazione della densità relativa (IRLD<sub>i</sub>) i cui valori sono definiti per ciascuna unità territoriale di calcolo e successivamente sommati per calcolare l'indice globale densità di franosità (ILD):

$$IRLD_i = \ln W_i = \ln \left( \frac{Densclasi_i}{Densmap} \right) = \ln \left[ \frac{NumF_i}{Area_i} \right] \left[ \frac{NumF_{tot}}{Area_{tot}} \right]^{-1} \quad (4.9)$$

$$ILD = \sum_i IRLD_i \quad (4.10)$$

dove:  $W_i$  è il peso attribuito alla classe  $i$  di ciascun tematismo;  $Densclasi_i$  è la densità di frane nella classe  $i$ ;  $Densmap$  è la densità di frane nell'intera mappa;  $NumF_i$  è il numero di frane della classe  $i$ ;  $Area_i$  è l'area della classe  $i$ ;  $NumF_{tot}$  è il numero totale di celle in frana;  $Area_{tot}$  è l'area totale.

Le variabili considerate nelle analisi sono state: le fasce altimetriche; le litologie affioranti; la pendenza dei versanti; la curvatura; l'esposizione; i sollevamenti differenziali; la distanza dal reticolo idrografico. Tra queste, le più significative in termini di capacità discriminante e di capacità delle singole variabili di contribuire al successo dell'analisi statistica sono risultate le fasce altimetriche, le litologie, la pendenza dei versanti e la curvatura. Un confronto tra la mappa di suscettibilità così ottenuta e l'inventario frane datato 2010 (Fig. 4.26) non solo mostra chiaramente il successo dell'analisi statistica ma consente di identificare le concavità morfologiche localizzate al bordo del massiccio della Sila come le aree a più alta suscettibilità da frane superficiali.

Nell'ottica di approfondire gli aspetti connessi con l'evoluzione delle concavità morfologiche, l'analisi a grande scala (1:5.000) è stata preliminarmente indirizzata all'individuazione e localizzazione, sulla base di criteri geomorfologici, dei meccanismi di instabilità prevalenti in un'area dell'estensione di circa 0.3 km<sup>2</sup> circa (Fig. 4.27) che rappresenta rispettivamente lo 0.2 % di quella investigata a media scala ed il 0.015% di quella a piccola scala. L'analisi svolta ha evidenziato la presenza essenzialmente di tre meccanismi (CZ1, CZ2, CZ3), ognuno caratterizzato da fattori morfometrici ben definiti e con una ben definita localizzazione lungo i versanti oltre che con una bene definita evoluzione nello spazio e nel tempo (Fig. 4.27).

Per rendere oggettivi i meccanismi individuati si sono svolte indagini in sito e di laboratorio sulle proprietà fisico-meccaniche dei terreni coinvolti nell'instabilità e sul regime delle pressioni neutre, inquadrando i dati sperimentali alla luce di quanto riportato in letteratura sui medesimi areali [GULLÀ *et al.*, 2004; CASCINI e MATANO, 2010] (Fig. 4.28). I risultati ottenuti sono stati preliminarmente utilizzati per la stima delle proprietà idrauliche dei terreni che si è conseguita attraverso una *back-analysis* delle misure di suzione in sito ad una stazione sperimentale, superando in tal modo le ben note difficoltà che si accompagnano alla sperimentazione in sito e di laboratorio dei terreni fessurati [FREDLUND *et al.*, 2010]. È

interessante osservare che l'analisi svolta da CIURLEO [2012] fornisce numerosi spunti di riflessione su una problematica di interesse molto più generale qual è quella del regime delle pressioni neutre nei terreni argillosi che, in base ai risultati ottenuti, appare strettamente connesso alla apertura e chiusura del sistema di fratture superficiali che si registrano sistematicamente nella stagione secca ed in quella delle piogge.

L'insieme dei dati ottenuti è stato, infine, utilizzato per svolgere analisi all'equilibrio limite dei fenomeni di instabilità esistenti. Così operando si è avuta conferma di tutte le osservazioni di carattere geomorfologico e, in particolare, delle differenze sostanziali della profondità delle superfici di scorrimento per i tre meccanismi che risultano, comunque, sempre localizzate al contatto tra formazione superficiale alterata e sottostante basamento.

La oggettivazione su basi geotecniche dei meccanismi e delle loro caratteristiche morfometriche unitamente alla loro non casuale localizzazione sui versanti è stata, quindi, utilizzata per generare una mappa delle coperture sulla base esclusivamente dei fenomeni in atto e potenziali. È interessante osservare che questo nuovo metodo, la cui validità è stata localmente verificata con adeguate indagini in sito, supera molte delle difficoltà presenti nei metodi tradizionali che si basano su elaborazioni statistiche di un certo numero di misure in grado di fornire solo raramente risultati di pratica utilità a grande scala, o in alternativa richiedono la realizzazione di indagini in sito costose e lunghe non praticabili per la rilevante estensione delle aree sede delle frane superficiali [CIURLEO, 2012].

La carta delle coperture così ottenuta è stata, infine, implementata in due modelli fisicamente basati (TRIGRS e TRIGRS-unsaturated) che si sono utilizzati per la zonazione a scala di versante della suscettibilità a frane superficiali. Confrontando i risultati ottenuti con l'evoluzione delle frane nel tempo (Fig. 4.29) sembra potersi concludere che le analisi svolte fanno di fatto riferimento ai differenti quadri fessurativi che si osservano sui versanti a secondo che siano sede o meno di fenomeni di instabilità. Pertanto, considerando che TRIGRS utilizza come dato di input la permeabilità satura dei terreni si potrebbe arguire che i risultati da esso forniti sono quelli di un quadro di fessure e fratture ben sviluppato sui versanti tipico di una stadio evolutivo molto avanzato della franosità. Al contrario, riferendosi alle proprietà idraulica dei terreni in condizione di parziale saturazione, TRIGRS-unsaturated appare in grado di cogliere lo stadio iniziale della franosità quando soltanto poche fessure – e per di più localizzate nelle porzioni alte dei versanti – sono osservabili con sistematicità.

In conclusione, la procedura adottata mette in relazione i fattori predisponenti la franosità superfi-

ciale a scala regionale con le cause innescanti a scala di pendio attraverso l'utilizzazione congiunta degli approcci geologici e geotecnici che, entrambi, si basano sull'idea che le frane non sono casualmente distribuite sul territorio. È appena il caso di ricordare che questa semplice assunzione e la sua dimostrazione su basi quantitative ha consentito di portare a termine lo studio con un impegno temporale ed economico di gran lunga inferiore a quello che ha caratterizzato gli studi in precedenza discussi.

#### 4.3. *Discussione*

I primi casi di studio analizzano due differenti problematiche passando entrambi dalla scala di dettaglio a quella piccola. In particolare, quattro singole frane (TRU e/o RAV) che hanno sede nei terreni di alterazione delle rocce gneissiche della Sila sono inizialmente analizzate secondo l'approccio classico della Geotecnica. I risultati ottenuti sono, quindi, generalizzati in termini di fattori predisponenti e cause innescanti in un'area estesa riconosciuta potenzialmente sede delle medesime fenomenologie. Con riferimento al secondo caso, lo studio parte dal presupposto che ci sia un carattere di omogeneità negli spostamenti delle frane a cinematica lenta che hanno sede nei terreni argillosi. Il modello proposto sulla base di tale assunzione riconosce, quindi, tre tipici andamenti di spostamento che sono definiti con l'ausilio dei dati di letteratura. Il modello utilizza, infine, tali andamenti a fini previsionali che non si sarebbero potuti perseguire in assenza sia delle dettagliate osservazioni di campo acquisite nel corso di decenni e sia della generalizzazione dei dati sperimentali analizzati.

Da entrambi i casi scaturisce, quindi, la centralità delle indagini in sito e di laboratorio nello studio di singoli versanti finalizzato a generalizzare i risultati ottenuti. Il rilevante impegno associato a tale approccio potrebbe, tuttavia, risultare insostenibile dal punto di vista tecnico-economico-temporale laddove fossero richieste, dalle Autorità competenti in materia di gestione del territorio, risposte veloci e scientificamente basate a problemi complessi che hanno sede su aree di rilevante estensione.

I due casi di studio successivi seguono un percorso opposto al precedente. In particolare, per i fenomeni che hanno potenzialmente sede nei terreni piroclastici della Campania, si valuta e si zona preliminarmente a piccola/media scala, e con l'ausilio delle curve F-N, la suscettibilità del territorio regionale a frane superficiali e/o altri fenomeni che danno origine a flussi rapidi. I meccanismi così individuati sono, quindi, analizzati e oggettivati a grande scala con modelli geotecnici usuali e/o avanzati che utilizzano le condizioni al contorno derivanti dagli studi a piccola/media scala. Per quanto riguarda le



frane superficiali nella Stretta di Catanzaro, in considerazione della incompletezza della carta inventario dei fenomeni franosi, l'attenzione è preliminarmente rivolta all'individuazione a piccola/media scala, e con l'ausilio dei metodi euristici, delle aree sede o potenzialmente sede di questi fenomeni. I modelli di evoluzione dei versanti così ottenuti sono, quindi, oggettivati e quantificati a grande scala con l'ausilio dei metodi geotecnici. Per limitare al minimo le possibilità di commettere errori fuorvianti si sono sistematicamente adottati come dati di input ad una determinata scala quelli che erano i dati di output degli studi svolti alla scala di minore dettaglio.

In definitiva, può dirsi che entrambi gli approcci adottati hanno preso spunto da intuizioni che si sono successivamente verificate con metodi progressivamente più oggettivi passando dalla piccola alla grande scala. Circostanza questa che può rendere l'approccio deduttivo (*top-down*) molto più veloce ed economicamente più sostenibile rispetto al precedente e, quindi, da privilegiare in un'ottica di pianificazione territoriale. Si deve, tuttavia, sottolineare che il progressivo approfondimento delle conoscenze secondo l'approccio top-down non consente necessariamente di creare un legame organico tra l'area vasta di partenza e le TRU e/o RAV che rappresentano l'ultimo, indispensabile tassello di validazione dell'intero percorso compiuto.

Indipendentemente dall'approccio prescelto è, comunque, indispensabile osservare che gli studi su area vasta, per potere fornire risultati significativi, devono essere fin dall'inizio impostati con una logica marcatamente interdisciplinare. Così operando l'approccio geologico e quello geotecnico, pur nella più assoluta ed indispensabile autonomia culturale, rappresentano due facce della stessa medaglia che può e deve essere spesa per il perseguimento di obiettivi rilevanti dal punto di vista applicativo oltre che scientifico. La necessità di privilegiare questa strategia di fondo era ben nota in tempi ormai remoti, come risulta evidente dalla prefazione di TERZAGHI [1953] al primo numero della rivista «Geotecnica» integralmente riportata nel testo in lingua inglese della presente nota.

Il pensiero di Terzaghi è quanto mai attuale e invita tutti ad una profonda riflessione per individuare percorsi e strategie che consentano di tradurlo in fatti concreti. Da questo punto di vista la capacità di fondere organicamente tra loro gli approcci geologici e geotecnici rappresenta, a parere dell'autore, solo una precondizione alla diffusione nella Comunità tecnica di studi su area vasta nell'ottica innanzi delineata. Numerosi sono, infatti, i contributi che possono concorrere al perseguimento di questo scopo e, tra questi, particolarmente significativa è la messa a punto di protocolli, procedure o linee di indirizzo che sappiano diffondere le modalità con le quali coniugare il rigore della Geotecnica con le intuizio-

ni della Geologia. Due tipici esempi in tal senso, e per entrambi gli approcci ai quali si è in precedenza fatto riferimento, sono riportati nel capitolo 3 e che fanno rispettivamente riferimento alle frane a cinematica lenta dell'Appennino Dauno [COTECCHIA *et al.*, 2014] e alle frane superficiali della Stretta di Catanzaro [CASCINI *et al.*, 2015a].

## 5. Il caso di studio della subsidenza

La subsidenza è diffusa in molti Paesi del mondo potendo essere originata da numerose cause tra le quali una delle prevalenti è rappresentata dall'estrazione di acqua e/o fluidi dal sottosuolo (Tab. V). Nonostante la rilevanza delle conseguenze, la previsione e prevenzione di questo fenomeno, in un'ottica di pianificazione territoriale e gestione della risorsa suolo, non è tuttavia messa al centro degli adempimenti legislativi di molte nazioni né risulta approfondita con sistematicità nella letteratura. Sono, viceversa, disponibili studi e ricerche avanzate in alcune realtà territoriali che lasciano intravedere la possibilità di colmare il gap gestionale esistente. Possibilità che appare ancora più concreta se si fa riferimento ad alcuni esempi virtuosi quali quelli riguardanti gli Stati Uniti [LEAKE, 2004], la città di Shanghai [WANG *et al.*, 2014] e la Regione Emilia-Romagna [BENEDETTI *et al.*, 2000].

Nell'ottica di fornire un contributo che consenta di compiere ulteriori passi in avanti sul tema in discussione, qui di seguito si mostrano due casi di studio di cui il primo condotto con il classico approccio di tipo induttivo (*bottom-up*) ed il secondo con quello deduttivo (*top-down*) che è stato reso possibile dalla recente evoluzione ed innovazione tecnologica [MANDOLINI e MANASSERO, 2011], non immaginabile solo pochi anni or sono.

### 5.1. Dalla grande alla piccola scala

Il caso di studio descritto nel presente paragrafo prende le mosse dai primi passi compiuti molti anni or sono dallo scrivente quando gli fu chiesto di individuare il nesso di casualità tra sfruttamento della risorsa idrica sotterranea nell'abitato di Sarno (Fig. 5.1) e i danni registrati ad alcuni edifici ubicati nel centro abitato.

In assenza di un'esperienza personale consolidata sull'argomento e di dati sistematici sull'andamento dei fenomeni in atto, si diede quindi l'avvio ad un'indagine nell'area ritenuta di interesse. L'indagine complessivamente contemplò: n. 8 sondaggi attrezzati con piezometri (di cui 6 Casagrande e 3 a tubo aperto) ed un estensimetro in foro; il prelievo di campioni indisturbati e l'esecuzione di prove di laboratorio per la determinazione delle

proprietà fisico-meccaniche e di deformabilità dei principali litotipi presenti nel sottosuolo; la misura degli spostamenti superficiali a n. 18 capisaldi, con misure di livellazione topografica di alta precisione; il rilievo dei danni agli edifici e del loro andamento nel tempo con estensimetri posizionati in corrispondenza di lesioni ritenute significative; la localizzazione delle numerose sorgenti presenti nel centro abitato e la caratterizzazione dell'andamento della loro portata nel tempo; l'acquisizione dei dati disponibili sulle piogge e su altre grandezze ritenute significative ai fini della comprensione dei fenomeni in atto.

Rimandando a CASCINI e DI MAIO [1994] per una descrizione dettagliata delle indagini svolte, qui si osserva che il confronto tra quote piezometriche misurate e i cedimenti registrati ai capisaldi a essi più vicini evidenziò tre aspetti rilevanti, rispettivamente rappresentati da: incremento dei cedimenti al diminuire delle quote piezometriche; persistenza di tale incremento, ancorché con gradiente minore, per quote piezometriche pressoché costanti; valori assoluti dei cedimenti significativamente variabili nell'area di studio.

In presenza di un sottosuolo abbastanza omogeneo, i dati sperimentali in precedenza elencati misero in luce la possibilità che i cedimenti misurati fossero da mettere in relazione con la presenza o meno di strati di torba di spessore variabile da luogo a luogo. È interessante osservare che, effettuando un'analisi dei cedimenti – con i metodi classici della Geotecnica, i dati disponibili sui terreni e le misure eseguite ai piezometri – si ritrovarono, in buona sostanza, i cedimenti misurati nell'area a riprova dello stretto legame, nel periodo di osservazione, tra causa (abbassamento della falda) ed effetto (cedimento).

A valle di questa evidenza sperimentale sorse, quindi, la necessità di verificare se esistesse una correlazione tra gli abbassamenti della falda e gli emungimenti nell'abitato di Sarno, da una parte, e tra abbassamenti del piano campagna e danni agli edifici dall'altro. Si deve, tuttavia, dire che fin dall'inizio apparve proibitiva la risposta al secondo quesito per la limitatezza dei rilievi topografici che non consentivano di ricostruire la deformata degli edifici, indispensabile per individuare i cedimenti differenziali e, quindi, i legami tra questi e i danni osservati. Quest'ultimi, d'altra parte, apparivano complessi come si legge in NIGRO [1992] che, con riferimento all'edificio in figura 5.2, attribuisce al terremoto i danni registrati alla Chiesa ed ai cedimenti quelli dell'edificio adiacente sede del Comune di Sarno.

Per il primo quesito si confrontarono tra loro gli andamenti nel tempo delle quote piezometriche e delle portate alle sorgenti presenti immediatamente a ridosso del centro abitato. Il confronto dei due

trend, unitamente alle analisi svolte sulla piovosità registrata nei medesimi anni dimostrò, inequivocabilmente, che le opere di emungimento erano da ritenere una delle cause alla base dei cedimenti. È interessante osservare come le relazioni statistiche individuate tra piovosità dell'area e portate misurate alle sorgenti, unitamente alla messa a punto di ulteriori modelli di tipo statistico, siano state utilizzate da [CASCINI e CASCINI, 1994] per individuare, in funzione della piovosità dell'anno precedente, le portate da emungere senza deprimere l'abbassamento della falda e, quindi, senza indurre i cedimenti nel centro abitato.

Una volta aggiunto questo ulteriore tassello al quadro delle conoscenze che si andava delineando, la scoperta di un set di misure ad un piezometro installato nell'area più di venti anni prima (Fig. 5.3) aprì un ulteriore fronte in quanto le drastiche riduzioni delle quote piezometriche nel ventennio antecedente non potevano, in alcun modo, essere messe in relazione con le opere di emungimento presenti nell'abitato di Sarno [CASCINI e DI MAIO, 1994].

Tale osservazione fornì, quindi, lo spunto per un ulteriore allargamento delle indagini all'intera Piana campana (Fig. 5.1) che è sede di risorse idriche importanti in quanto alimentate in profondità dai massicci (carbonatici e vulcanici) che la bordano. Così operando si osservò un drastico cambiamento nel regime delle acque sotterranee negli anni '70 e '80 (Fig. 5.4), periodo nel quale furono realizzate imponenti opere di captazione, essenzialmente concentrate nella zona di Lufrano, per fare fronte ai fabbisogni idrici della città di Napoli. Circostanza questa che evidenziò un inizio della subsidenza nell'abitato di Sarno antecedente all'entrata in funzione delle opere presenti sul territorio comunale che, di fatto, avevano reso evidente un fenomeno in atto da molti anni, ancorché di intensità notevolmente inferiore a quella degli anni '90.

Sulla base di tale considerazione si può quindi concludere, ove mai ce ne fosse bisogno, che gli studi sulle acque sotterranee e sul loro sfruttamento, per essere significativi, devono abbracciare un lasso temporale ampio e coinvolgere aree di rilevante estensione in quanto gli effetti in una zona possono risentirsi nel tempo anche a grande distanza dalle zone di captazione [CASCINI, 1996]. In tale ottica risultano particolarmente preziosi studi quali quelli messi a punto dal Distretto Idrografico dell'Appennino Meridionale (<http://www.ildistrettoidrograficodellappenninomeridionale.it/>) che, recentemente, ha approfondito il tema delle acque sotterranee a scala di Distretto idrografico. Le conoscenze acquisite rappresentano, infatti, l'indispensabile punto di partenza per gli studi a scala di maggiore dettaglio quali quelli in precedenza illustrati.

## 5.2. Il contributo della tecnologia nell'acquisizione dei dati di base

La mancanza di dati non ha consentito di individuare, a scala regionale, le relazioni esistenti tra emungimenti nella Piana campana e cedimenti nell'abitato di Sarno e la possibile sussistenza nel medesimo periodo temporale di fenomeni di subsidenza in zone limitrofe. Inoltre, a scala comunale, è risultata evidente l'impossibilità di correlare gli emungimenti nell'abitato di Sarno con i danni registrati agli edifici.

I tentativi per superare questi limiti con i tradizionali metodi di misura non sono diffusi in letteratura. Uno di questi è quello della Regione Emilia-Romagna che, a partire dagli anni settanta, ha installato sul proprio territorio una rete sempre più fitta di punti di misura (Fig. 5.5a), attualmente costituita da 3.000 capisaldi di livellazione topografica, che danno origine a circa 3.000 km di allineamenti in un'area di 8.609 km<sup>2</sup> [BENEDETTI *et al.*, 2000], e da 60 capisaldi GPS ubicati in 12 zone stabili [BITELLI *et al.*, 2000]. Questi punti di misura hanno consentito la generazione di una prima mappa di subsidenza (Fig. 5.5b) che, tuttavia, risulta inevitabilmente lacunosa e fortemente disomogenea per la diversa copertura spaziale e temporale dei dati storici di misura degli spostamenti superficiali.

Una possibilità per superare questi limiti con costi sicuramente più contenuti di quelli delle tecniche tradizionali è attualmente fornita da una innovazione tecnologica che, in accordo con MANDOLINI e MANASSERO [2011], può intendersi come ... *un qualcosa che deriva da un processo trasversale che connette almeno due domini tecnologici, determinando un repentino cambiamento in almeno uno dei due*. Nel caso in questione si fa riferimento all'Ingegneria dell'Informazione per la misura degli spostamenti con le tecniche interferometriche differenziali (DInSAR) e ai modelli geotecnici per la stima dei cedimenti (Fig. 5.6).

Con riferimento alla tecnologia satellitare, la figura 5.7 fornisce gli elementi di base della evoluzione storica dei sensori SAR fin dal 1992, data di entrata in funzione di ERS-1. Le frequenze dei sensori sono generalmente collocate nelle bande L, C ed X che corrispondono rispettivamente a lunghezze d'onde di circa 18 cm, 5,6 cm e 3,1 cm [PEDUTO *et al.*, 2015]. In breve si può dire che per i sensori oggi si va dall'alta (ERS1-2, RADARSAT, ENVISAT, per i sensori operanti in banda C) all'altissima (Cosmo-SkyMed, TerraSar-X, per i sensori operanti in banda X) risoluzione [BREFORT, 2011], con database che coprono complessivamente un periodo che si estende dal 1992 ad oggi (Fig. 5.7). Le tecniche interferometriche DInSAR multipassaggio sono molteplici e comprendono sia la Persistent Scatterers Interferometry (PSI), in cui rientra la tecnica originaria dei Permanent Scatterers - PS [FERRETTI *et al.*, 2001]

e sue similari, e sia gli approcci del tipo Small BASEline (SBAS) [BERARDINO *et al.*, 2002; FORNARO *et al.*, 2009]. Entrambe consentono la misura sub-centimetrica degli spostamenti e millimetrica delle velocità medie di spostamento di punti della superficie topografica (target) che possono essere rappresentati da elementi naturali (rocce esposte) o antropici (ad esempio edifici, strade, condotte, linee ferroviarie, antenne, strutture metalliche etc.). Le potenzialità di questa nuova tecnologia sono messe in luce nel nostro Paese sia dal contributo decisivo fornito su molteplici temi da persone operanti nel campo della ricerca e sia dal sistematico finanziamento di progetti nazionali (Piano Straordinario di Telerilevamento - PST - promosso dal Ministero dell'Ambiente) e regionali (ARPA Piemonte, ARPA Emilia-Romagna, Regione Lombardia, Regione Liguria, Regione Campania, etc.).

Il patrimonio di conoscenze disponibili nell'Ingegneria Civile per l'analisi degli spostamenti e, più in particolare, degli effetti da questi indotti sulle strutture è ben noto e si rimanda, quindi, il lettore ai libri di testo consolidati tra i quali quelli redatti da VIGGIANI [1999] e LANCELLOTTA [2004]. Molto più proficua è, viceversa, in questa sede l'analisi delle modalità con le quali si può perseguire l'innovazione tecnologica che, secondo lo schema in figura 5.8, richiede la preliminare definizione dei campi di competenza di ogni singola disciplina e degli aspetti da approfondire congiuntamente per valorizzare la expertise di ognuna di essa.

In particolare, l'esperto della subsidenza è quello deputato a definire: l'estensione dell'area da investigare; la copertura vegetale e la presenza di strutture/infrastrutture al suo interno; le eventuali modifiche topografiche occorse nel periodo di osservazione; finalità, scala, griglia operativa ed orizzonte temporale delle analisi; utilizzazione dei dati DInSAR; etc. Sulla base degli elementi così definiti, l'esperto del processamento delle immagini può, quindi, individuare il dataset di immagini da selezionare che è funzione delle caratteristiche del sensore (banda, dati orbitali, geometria di acquisizione, risoluzione, archivio di immagini disponibile sull'area di studio, tempo di rivisitazione) e della dimensione della scena. Segue poi la selezione dell'algoritmo per il processamento delle immagini SAR che deve essere preferibilmente operata da entrambi gli esperti per una selezione ottimale dei dati da utilizzare nelle analisi del fenomeno e che riguardano velocità, serie storica, coerenza e punto di aggancio. Le fasi successive sono rispettivamente a carico dell'esperto del processamento e di quello della subsidenza al quale è demandata l'interpretazione finale del dato DInSAR.

Le indagini basate sui dati satellitari si possono naturalmente svolgere con un diverso livello di dettaglio a differenti scale topografiche di riferimen-

to, ognuna delle quali da analizzare per il raggiungimento di un ben determinato scopo. In tale ottica, nell'individuare ben definite procedure per ognuna delle scale topografiche di analisi (Fig. 5.8), PEDUTO *et al.* [2015] suggeriscono l'uso di un approccio a cascata che preveda nell'ordine: l'individuazione a piccola scala (< 1:100.000) delle aree in pianura sede di cedimenti; la classifica dei territori comunali presenti al loro interno nei quali condurre analisi di maggiore dettaglio a scala intermedia (da 1:100.000 a 1:25.000); l'approfondimento delle conoscenze a grande scala (da 1:25.000 a 1:5.000) nelle porzioni di territori comunali potenzialmente sede di danni significativi al costruito; l'analisi approfondita a scala di dettaglio (>1:5.000) di singoli edifici per la individuazione delle relazioni causa-effetto e la valutazione della severità del danno con l'ausilio di modelli geotecnici avanzati.

Le potenzialità delle procedure proposte e dell'evoluzione tecnologica in precedenza illustrata sono qui di seguito discusse partendo dalle questioni irrisolte per la Piana Campana alle quali si è fatto riferimento nel precedente paragrafo.

### 5.3. Dalla piccola alla scala di dettaglio con l'ausilio della tecnologia

La prima questione irrisolta riguardante l'esistenza o meno di altre aree in subsidenza nella Piana Campana, in conseguenza del mutato regime idrico sotterraneo, trova una immediata risposta facendo riferimento a piccola scala (1:100.000) ai dati satellitari disponibili fin dal 1992. In particolare, la figura 5.9 illustra i risultati che PEDUTO *et al.* [2015] hanno ottenuto, una volta fissata una soglia di movimento pari a 1,5 mm/anno, con l'introduzione dell'Indice dei Comuni Subsidenti ( $I_{CS}$ ) definito come:

$$I_{sm} = \frac{\left( \frac{U_m}{U_c} \right)_{M_i}}{\sum_{M_i=1}^n \left( \frac{U_m}{U_c} \right)_{M_i}} \quad (5.1)$$

dove  $U_m$  è l'estensione dell'area urbanizzata con evidenze di movimento,  $U_c$  è l'estensione dell'area urbanizzata coperta da dati DInSAR,  $U_{tot}$  è l'estensione dell'area urbanizzata,  $C_i$  è un contatore relativo all'*i*-esimo comune all'interno dell'area considerata.

Facendo riferimento ai territori caratterizzati dai valori più elevate dell'indice  $I_{sm}$ , la letteratura consente di correlare i cedimenti alle cause innescanti la subsidenza. In particolare, COCCO *et al.* [1993] illustrano i processi erosivi che interessano la linea di costa di Castel Volturno che è, altresì, affetta da una

diffusa subsidenza [CORNIELLO *et al.*, 2010] associabile anche all'ingressione del cuneo salino [CASCINI *et al.*, 2007a], a sua volta favorita dall'emungimento delle acque sotterranee. LANARI *et al.* [2004] descrivono, per il Comune di Pozzuoli e i Campi Flegrei, l'attività bradisismica che affligge l'area e gli effetti al suolo a essa correlati. BORGIA *et al.* [2005] discutono i processi deformativi legati all'attività del complesso vulcanico del Somma-Vesuvio, mentre LANARI *et al.* [2004] e CASCINI *et al.* [2007a; 2013d] attribuiscono i cedimenti nel Comune di Napoli alla realizzazione della linea della metropolitana collinare. Infine, i cedimenti della Piana Campana sono, senza dubbio, ascrivibili all'intensivo sfruttamento della risorsa idrica sotterranea, come discusso nel precedente paragrafo.

Focalizzando, quindi, l'attenzione su quest'ultima area, nella figura 5.10 si opera un confronto tra le misure di livellazione topografica eseguite nel periodo luglio 1992 - ottobre 1993 e i dati DInSAR riferiti al periodo giugno 1992 - novembre 1993 derivanti dalla implementazione dell'algoritmo SBAS a bassa risoluzione [CASCINI *et al.*, 2006a]. La figura evidenzia il livello di dettaglio di gran lunga superiore della mappa dei cedimenti ottenuti con i rilievi satellitari sull'intero territorio comunale, su una griglia di  $10 \times 10$  m, rispetto a quello fornito dalle livellazioni topografiche su n. 18 capisaldi. Circostanza questa che consente l'individuazione delle fasce di territorio sede di aliquote comparabili di cedimento e, presumibilmente, di danni all'edificato. È interessante osservare a tale riguardo che i cedimenti assumono il valore massimo di 16 cm durante circa 12 anni di osservazione, in prossimità del caposaldo n. 527 ubicato nei pressi della sorgente Cerola, dove i sondaggi realizzati all'inizio degli anni '90 avevano individuato depositi di torba di 6 m circa di spessore [CASCINI e DI MAIO, 1994].

Volendo, quindi, approfondire ulteriormente le conoscenze nella zona sede dei cedimenti assoluti più elevati, CASCINI *et al.* [2006a] hanno redatto, sempre con l'ausilio dei rilievi satellitari, la mappa dei gradienti di deformazione spaziale della superficie topografica. La figura 5.11 evidenzia, come era lecito attendersi, che gli edifici maggiormente danneggiati sono quelli localizzati nelle aree dove i gradienti assumono i valori maggiori che risultano localizzati in una stretta fascia parallela al fronte del massiccio che borda l'abitato [CASCINI e DI MAIO, 1994]. Focalizzando poi l'attenzione sullo stato fessurativo di tali edifici, CASCINI *et al.* [2007b] mettono in relazione le deformate del piano campagna con i differenti danni osservati alle costruzioni in muratura e a quelle in calcestruzzo armato delle quali in figura si riportano due esempi. Il primo (edificio 1 in Fig. 5.11) ha ruotato rigidamente senza che si manifestassero lesioni all'interno delle abitazioni, mentre il secondo (edificio 2 in Fig. 5.11) è sede di una lesione verticale in

corrispondenza della tompagnatura esterna di un vano scala.

Una volta zonata la distribuzione spaziale dei danni, il quadro fessurativo di un singolo edificio può essere ulteriormente approfondito a scala di dettaglio con l'ausilio dei dati DInSAR elaborati ad alta risoluzione [LANARI *et al.*, 2004] come nel caso in figura 5.12a per il quale le misure topografiche non hanno consentito di sviluppare alcun tipo di analisi. Al contrario, i dati DInSAR e il metodo di SKEMPTON e McDONALD'S [1956] confermano quantitativamente le ipotesi formulate da NIGRO [1992] che, come, già detto, attribuisce al sisma le lesioni alla Chiesa ed ai cedimenti differenziali quelle al Municipio [CASCINI *et al.*, 2007b]. Circostanza questa messa bene in evidenza dai diagrammi in figura 5.12b, che – in corrispondenza di sezioni longitudinali – evidenziano cedimenti differenziali pressoché nulli nel primo caso e di assoluto rilievo nel secondo; questi ultimi sono, peraltro accompagnati da rotazioni lungo una sezione trasversale (Fig. 5.12c). Inoltre, nonostante il progredire della subsidenza nel corso del tempo, il trend dei cedimenti differenziali stimato con i dati satellitari spiega con chiarezza, con l'ausilio della rotazione relativa  $\beta$  [BURLAND e WROTH, 1974], il non aggravamento del quadro fessurativo nei successivi 12 anni di tempo (Fig. 5.13).

Un ulteriore esempio che mostra le enormi potenzialità dei rilievi satellitari nella risoluzione, a scala di dettaglio, dei problemi geotecnici è quello che riguarda 14 edifici (Fig. 5.14) con fondazioni superficiali (travi rovesce e, localmente, platee) costruiti, tra il 2002 ed il 2005, in un'area del Comune di Baronissi (SA) il cui sottosuolo è costituito da un'alternanza di terreni detritici e di origine vulcanica [SANTORO, 2001].

In corrispondenza di questi edifici si è osservato un quadro fessurativo evidente a partire dal 2011, la cui severità si è ulteriormente aggravata negli anni successivi. Per comprendere la natura dei danni si sono, quindi, sviluppate le analisi geotecniche classiche che hanno fornito un cedimento massimo di 3 cm dal quale scaturiscono cedimenti differenziali e distorsioni angolari tali da non giustificare il quadro fessurativo osservato. Conseguentemente si sono allargati gli orizzonti delle analisi facendo riferimento alle misure satellitari, disponibili con il progetto PST, che sono state utilizzate per generare con algoritmi appropriati [MANZO *et al.*, 2006] mappe di cedimenti assoluti in differenti periodi dell'anno (Fig. 5.15).

Così operando è stato possibile comprendere che l'area in questione è stata sede di un fenomeno di subsidenza a partire dal 2003, vale a dire in concomitanza della realizzazione degli edifici, e che si è sviluppato negli anni con il progressivo coinvolgimento di aree anche esterne al perimetro dell'area di sedime di quest'ultimi. La cartografia prodotta ha, al-

trisi, evidenziato che i cedimenti indotti dalla subsidenza sono della stessa entità di quelli calcolati portando in conto le sole azioni trasmesse al sottosuolo dai singoli edifici e, sommati a questi, giustificano pienamente il quadro fessurativo osservato [CASCINI *et al.*, 2006a].

#### 5.4. Discussione

I casi discussi nel presente capitolo evidenziano la supremazia dell'approccio di tipo deduttivo (*top-down*) rispetto a quello induttivo (*bottom-up*) nell'analisi della subsidenza che è, spesso, indotta da fattori antropici e, come tale, da investigare caso per caso. Il ricorso a questo approccio è attualmente facilitato da una innovazione tecnologica facile da applicare in aree densamente urbanizzate e per la quale si dispone di un database a partire dal 1992. Ne consegue la possibilità sia di individuare a costi contenuti e su territori di elevata estensione le aree in subsidenza e sia di seguirne l'evoluzione nel tempo senza dovere ricorrere a quelle intuizioni preliminari che, come argomentato nel precedente capitolo, sono del tutto indispensabili negli studi a carattere deduttivo sui movimenti franosi.

Ne consegue l'assoluta necessità per ricercatori e tecnici di stare al passo con la tecnologia che è in grado di concorrere, con una molteplicità di ulteriori applicazioni, ad una gestione del territorio del tutto innovativa. È questo, per esempio, il caso dell'Italia che ha dato l'avvio alcuni anni or sono al Piano Straordinario di Telerilevamento che prevede l'acquisizione, da parte del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), di dati prodotti da Telerilevamento con tecnica Laser-scanning LiDAR a media densità da piattaforma su aeromobile. In particolare, si prevede il monitoraggio di tutta la linea di costa italiana con un buffer di 800 m verso l'interno, di tutte le aste fluviali di I, II e III ordine riportate nel catalogo dei fiumi dell'IGM con un buffer di 350 m su entrambe le sponde e di circa 11.000 kmq di aree critiche individuate in base alle informazioni fornite al MATTM dalle Autorità di Bacino (<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/costa/il-rilievo-lidar>). Ad oggi, secondo fonti del MATTM, il 49% del territorio nazionale risulta coperto; la densità dei punti del rilievo è superiore a 1,5 punti per mq, il modello digitale del terreno presenta un'accuratezza altimetrica di  $\pm 15$  cm e un'accuratezza planimetrica di  $\pm 30$  cm ([http://www.pcn.minambiente.it/GN/leggi/EcoCity\\_Expo\\_Pisa\\_2.pdf](http://www.pcn.minambiente.it/GN/leggi/EcoCity_Expo_Pisa_2.pdf)).

Una mole così rilevante di dati potrà, inoltre, essere ulteriormente e localmente aggiornata con l'impiego di droni (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) operanti senza personale di bordo, ad altezze comprese tra 100 m e oltre 30.000 m, con autonomia va-

riabile (1-48 ore) e sui quali possono essere installati differenti tipologie di sensore a seconda dei dati da acquisire ([http://3dom.fbk.eu/files/uav/slides/CNR\\_IRPI.pdf](http://3dom.fbk.eu/files/uav/slides/CNR_IRPI.pdf)). Circostanze queste che rendono di fatto possibile il monitoraggio di subsidenza e frane sia in situazioni ordinarie e sia in fase di emergenza quando alcune aree risultano di difficile accessibilità.

Per quanto riguarda i rilievi satellitari SAR i sensori di ultima generazione sono stati già in precedenza richiamati mentre la figura 5.16 mostra i risultati forniti processando i dati TerraSAR-X per l'hotel Mirage a Las Vegas [REALE *et al.*, 2011] e quelli di COSMO-SkyMed per la rete alta velocità di Napoli [CASCINI *et al.*, 2013d]. Risultati altrettanto accurati sono già oggi o saranno in futuro acquisiti, con costi contenuti, alla scala del singolo manufatto. A puro titolo esemplificativo si fa riferimento ai sensori a fibre ottiche che negli ultimi anni hanno mosso con successo i primi passi in numerosi contesti quale, per esempio, il controllo strutturale degli edifici attraverso il rilievo di parametri critici rispettivamente rappresentati da deformazioni, temperatura, etc.

È opinione dell'autore che tra non molti anni sistemi di monitoraggio così accurati, economici ed affidabili cambieranno in misura significativa le modalità di comprensione e di analisi di numerose problematiche che hanno sede sul territorio e, tra queste, le frane e la subsidenza. Inoltre, l'autore ritiene che la disponibilità di sistemi di monitoraggio diffuso del territorio incideranno significativamente sulle modalità di progettazione e collaudo di strutture ed infrastrutture talora basate su diagrammi derivanti da un numero limitato di osservazioni di campo – come nel caso dei cedimenti in fondazione (e di grandezze a questi correlate) – che, molto velocemente, saranno sostituiti da un numero incredibilmente alto di dati sperimentali.

Al fine di incanalare e valorizzare il corretto uso di una così imponente mole di dati, l'autore ritiene indispensabile ed urgente la messa a punto di metodologie appropriate e condivise che rendano consistenti le analisi da svolgere e, nel contempo, impediscano l'uso scorretto e non sicuro dei nuovi database che potrebbe minarne alla base la loro enorme potenzialità.

## 6. Applicabilità degli approcci descritti

I capitoli precedenti focalizzano l'attenzione sulle procedure che possono consentire alla Geotecnica di affrontare problematiche complesse su area vasta e di fornire un contributo significativo nella pianificazione territoriale e nella gestione della risorsa suolo, vale a dire le prime due questioni promosse da Croce nel corso della tavola rotonda al XII Convegno Nazionale di Geotecnica (1975). Le iniziative

tecnico/scientifiche, gli strumenti di carattere giuridico e quelli di carattere amministrativo che richiedono il coinvolgimento della nostra Comunità nella pianificazione territoriale (la terza questione aperta da Croce, v. Cap. 1) sono qui di seguito discussi. In considerazione del ruolo rilevante giocato dagli aspetti economici nella risoluzione dei problemi tecnici, alcuni commenti finali sono rivolti in questo capitolo alla urgente necessità di una gestione sostenibile del territorio in grado di superare la pratica corrente non più praticabile in molte nazioni.

### 6.1. Iniziative recenti per una gestione avanzata delle aree urbanizzate

L'Unione Europea (EU) e numerosi Paesi extra-europei incoraggiano uno sviluppo sostenibile ed una gestione avanzata del territorio attraverso il finanziamento di progetti di ricerca su temi specifici e l'emanazione di comunicazioni, direttive e linee d'indirizzo. Tipici esempi di direttive della EU che disciplinano le interazioni tra l'acqua (in termini di qualità, quantità, etc.) e le infrastrutture, i sistemi culturali ed ambientali sono rappresentati dalla *Water Framework Directive* (2000/60/EC) e dalla *Flood Framework Directive* (2007/60/EC). Un esempio di lavoro svolto in ottemperanza alla direttiva 2007/60/EC è fornito in figura 6.1 che riporta la zonazione della pericolosità e del rischio di alluvioni sviluppata dal Distretto Idrografico dell'Appennino Meridionale in un'area dell'estensione complessiva di circa 31.000 km<sup>2</sup>. Nel caso in questione, facendo riferimento a numerosi beni esposti (strutture strategiche, patrimonio culturale, attività economiche, siti di interesse nazionale e regionale, etc.) sono risultate a rischio numerose aree per uno sviluppo complessivo di circa 1,500 km<sup>2</sup>.

Con riferimento alle direttive appena citate si può ipotizzare che i Paesi membri della EU possano essere chiamati di qui a poco a produrre uno sforzo analogo nel campo della zonazione del rischio da frana e di subsidenza. Per i movimenti franosi questa percezione è resa evidente da diverse iniziative intraprese in anni recenti sia in Europa e sia in Italia tra le quali si citano il progetto di ricerca SafeLand, diverse *calls* di Horizon 2020 e due progetti di ricerca di rilevante interesse nazionale [PRIN 2007 e PRIN 2010-2011] finanziati dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca.

Il progetto SafeLand – “Convivere con il rischio da frana in Europa: valutazione, effetti a scala globale, e strategie di gestione del rischio” – è stato finanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro di Ricerca, Tema 6 “Ambiente”, Sub-attività 6.1.3. “Pericoli naturali”. Il progetto è stato sviluppato da 27 istituti di ricerca di 12 Paesi dell'Unione Europea che hanno elaborato

diversi prodotti tra i quali linee guida per *i*) la zonazione a differenti scale topografiche della suscettibilità, pericolosità e rischio da frana nonché *ii*) per l'impiego di tecniche di monitoraggio da remoto e l'implementazione di sistemi di allerta. La *call* di Horizon 2020 dal titolo *Science and innovation for adaptation to climate change: from assessing costs, risks and opportunities to demonstration of options and practices*, stabilisce che le attività di ricerca e innovazione proposte dovranno essere adeguatamente coordinate e raggruppate per pervenire a strumenti e metodi trasferibili su basi standardizzate in materia di impatti dei cambiamenti climatici, vulnerabilità, costi, benefici, rischi e opportunità.

In Italia, il progetto PRIN 2007 su "Analisi e zonazione della suscettibilità e pericolosità da frane innescate da eventi estremi (piogge e sisma)" ha fornito procedure e metodi per sviluppare e armonizzare le zonazioni della suscettibilità e della pericolosità da frane (pluvio- o sismo-indotte) a differenti scale topografiche di riferimento (da 1:2.000 a 1:100.000) con la finalità di agevolare e rendere tra loro congruenti le procedure a tal riguardo adottate dalle autorità nazionali, regionali e locali. Il progetto PRIN 2010-2011 su "La mitigazione del rischio da frana mediante interventi sostenibili" è sviluppato da 9 Unità di Ricerca che focalizzano l'attenzione su numerose tematiche incentrate sulla sostenibilità di interventi innovativi di mitigazione del rischio da frana, per una gestione di quest'ultimo che sia in grado di coinvolgere organicamente le autorità centrali e quelle locali.

In considerazione del fatto che gli esempi precedenti mettono in luce la sussistenza di numerose precondizioni per affrontare le tematiche territoriali con gli strumenti propri della Geotecnica, CASCINI [2014] sottolinea che questo obiettivo può essere raggiunto solo se altre questioni fondamentali sono correttamente affrontate (Fig. 6.2a), come brevemente discusso nel paragrafo successivo.

## 6.2. Il ruolo degli strumenti normativi

L'applicabilità dell'approccio proposto in un determinato Paese è strettamente connessa alla legislazione vigente oltre che alla sua tradizione giuridica in materia di gestione del territorio. Argomento questo recentemente affrontato per l'Italia da CASCINI [2014] che si sofferma sulla zonazione del rischio da frana vigente dal 2001 (L. 226/99, L. 365/2000), usualmente sviluppata a scala 1:25.000 e basata su quattro differenti classi di rischio (R1-R4) che impongono differenti vincoli in materia di pianificazione territoriale. In particolare, nelle aree classificate R4 (rischio molto elevato) e R3 (rischio elevato), all'interno delle quali sono possibili la perdita di vite umane/problemi per l'incolumità delle persone e danni gravi/

funzionali al patrimonio strutturale, nuove strutture ed infrastrutture possono essere realizzate soltanto se pubbliche o di interesse pubblico nonché riferite a servizi essenziali e non delocalizzabili. Le costruzioni private sono, viceversa, consentite nelle aree classificate R2 (rischio medio) ed R1 (rischio moderato), vale a dire dove sono danni minori/marginali sono previsti per il patrimonio strutturale ed infrastrutturale esistente; la realizzazione di nuovi insediamenti è, comunque, subordinata alla esecuzione di indagini e studi di dettaglio che devono dimostrare il non aggravamento della situazione preesistente a seguito della loro realizzazione. La zonazione vigente, consultabile sul Geoportale Nazionale del MATTM (<http://www.pcn.minambiente.it/GN/>), sin dall'inizio è stata accolta con favore dalla Comunità degli urbanisti [SESSARO, 2000; ORLANDIN, 2000; MENONI, 2000; LOMBARINI, 2003; ZAZZI, 2004 e 2012]. Una analoga risposta positiva non è stata fornita da numerose categorie di tecnici che osservano la differenza significativa tra la scala della pianificazione territoriale (>1:5.000) e quella della zonazione del rischio (1:25.000 e solo in alcuni casi 1:5.000). Discrasia che, a parere dell'autore, può essere superata solo attraverso la valutazione quantitativa del rischio (QRA) da sviluppare con i metodi della Geotecnica del tutto analoghi a quelli illustrati e discussi nei precedenti capitoli. Così operando, in un'ottica multi scalare, gli elaborati esistenti assumerebbero una funzione informativa ed unificante, a scala regionale, delle carte del rischio sviluppate ad una scala compatibile con quella della pianificazione territoriale (> 1:5.000).

Le condizioni alla base del perseguimento di risultati significativi in tale ottica sono molteplici; tra queste appaiono di particolare rilevanza la convinzione della Comunità geotecnica di intraprendere un percorso impegnativo e duraturo, da una parte, e la possibilità di inquadrare il lavoro da svolgere nel più ampio panorama della normativa tecnica italiana (Norme Tecniche per le Costruzioni - NTC promulgate con il D.M. del 14 gennaio 2008) ed europea (EUROCODICE 7 e 8).

Con riferimento al primo aspetto è importante sottolineare che l'analisi e la mitigazione del rischio, vale a dire rispettivamente la prima e l'ultima fase del processo di gestione del rischio [Fell *et al.*, 2008a], possono essere proficuamente sviluppate soltanto con i modelli geotecnici, da calibrare e validare sugli eventi del passato con procedure del tipo di quelle illustrate nei capitoli 4 e 5. A valle di tale processo si potrà, quindi, sviluppare la fase di previsione introducendo la probabilità di accadimento dei fenomeni di interesse, indispensabile per la stima del rischio e della efficacia degli interventi di stabilizzazione che deve necessariamente essere comparata con l'efficienza ipotizzata in fase di progettazione.

Per quanto riguarda la normativa tecnica, FERLISI *et al.* [2014] osservano che le norme italiane non

si pronunziano in merito alla possibilità di condurre analisi statistiche volte ad associare alle cause d'inscendio delle frane un periodo di ritorno, sebbene le NTC richiamino l'esigenza di una appropriata conoscenza di tali fattori in relazione alla progettazione degli interventi strutturali di mitigazione del rischio. In tal modo, il progettista viene privato della possibilità di quantificare il rischio residuo conseguente alla realizzazione degli interventi che attualmente è resa complessa dalle incertezze generalmente considerate in forma globale e implicita [Ho, 2004]. Di conseguenza, gli interventi potrebbero risultare inutilmente sovradimensionati (con ovvie conseguenze anche sui costi, non solo di realizzazione ma anche di esercizio) e, comunque, non in grado di garantire – come, purtroppo, spesso erroneamente richiesto – la riduzione del rischio ad un valore nullo. Ne consegue l'urgenza di aggiornare le norme per consentire l'impiego del QRA e, nel contempo, di introdurre i criteri di accettabilità/tollerabilità per consentire sia la progettazione di interventi basati su ben definiti periodi di ritorno delle cause innescanti le frane e sia valutazioni costi-benefici portando in conto la vita nominale delle opere [FERLISI *et al.* 2014].

### 6.3. Pratica corrente e sostenibilità economica della mitigazione del rischio

L'altro architrave del processo di gestione in figura 6.2b è rappresentato dagli aspetti finanziari che giocano un ruolo di primo piano nel perseguimento di qualsiasi finalità prefissata. Con riferimento all'Italia, CASCINI [2014] evidenzia la tendenza consolidata nel nostro Paese ad intervenire a valle degli eventi calamitosi con finanziamenti consistenti che rappresentano, quindi, una misura indirizzata alla mitigazione del rischio residuo nei territori colpiti dagli eventi, da una parte, ed al rilancio dell'economia nei medesimi territori, dall'altra. Prassi non più perseguibile per la perdurante crisi economica e la vigente zonazione del rischio da frana. Un chiaro segnale della scarsità dei fondi oggi disponibili è reso palese dall'assenza di azioni significative in alcune aree recentemente colpite da eventi calamitosi quali, per esempio, il terremoto occorso nel 2012 in Emilia-Romagna. Per quanto riguarda il secondo aspetto si osserva che è impensabile oggi investire in misura massiccia per mitigare il rischio residuo nei territori colpiti dalle frane, per esempio classificati R3-R4 (elevato-molto elevato), quando nelle città limitrofe sono presenti zone caratterizzate da un analogo livello di rischio.

Unica alternativa a questo stato di fatto è rappresentato da una classifica delle aree classificate R3-R4 in un contesto geologico omogeneo che consenta di individuare gli interventi di mitigazione da realizzare prioritariamente. È questo, per esempio, il ca-

so dei 212 Comuni della Regione Campania, attualmente classificati R4, per i quali un dettagliato database sugli eventi occorsi sin dal 1640 consente di individuare un differente rischio per la Società con l'ausilio delle curve F-N [Operative Unit 2.38, 1998; CASCINI *et al.*, 2002; CASCINI e FERLISI, 2003; CASCINI *et al.*, 2008d]. È interessante osservare come, con l'ausilio di tale graduatoria e di interventi sostenibili, CASCINI [2011] individui un budget economico per la mitigazione del rischio a scala regionale comparabile con quello investito nella gestione di una sola emergenza e, per di più, programmabile nel tempo in funzione delle disponibilità economiche degli Enti responsabili della gestione del territorio.

Naturalmente il perseguimento di un obiettivo così ambizioso richiede il ricorso a studi di grande dettaglio nei Comuni di volta in volta ammessi a finanziamento da basare necessariamente su indagini particolarmente accurate, ancorché non significativamente costose, come quelle realizzate e descritte in FERLISI *et al.* [2015] per il Comune di Nocera Inferiore (SA) e in CUOMO e FORESTA [2015] per quello di Cervinara (SA). In entrambi i casi le indagini sono state realizzate in aree di rilevante estensione (> 400 ha) all'interno delle quali si sono eseguite prove geofisiche e penetrometriche, pozzetti scavati a mano e fiorettature, finalizzate a quantificare gli spessori dei depositi piroclastici di copertura e i relativi assetti stratigrafici. Le indagini sono state, altresì, integrate da misure di suzione in sito e da prove di laboratorio su campioni indisturbati in condizione di totale e di parziale saturazione.

La programmazione di indagini siffatte, non agevole quando a carico di singoli professionisti, può essere facilitata da una visione delle questioni tecniche come quella auspicata da Crespellani Allegretti alla tavola rotonda del XII Convegno Nazionale di Geotecnica di Cosenza quando, nel 1975, osservò che: *Tra le condizioni che soggiacciono alla possibilità che il ruolo della Geotecnica si sposti sempre più concretamente ed efficacemente a monte delle scelte sul territorio, vi è certamente quella che la conoscenza delle caratteristiche meccaniche del sottosuolo progredisca con rapidità crescente sia qualitativamente che quantitativamente [...]. Ciò comporta che [...] vada affrontato il problema della razionalizzazione e del coordinamento delle indagini del sottosuolo e che partendo dall'analisi degli strumenti disponibili in campo teorico si studi una ipotesi operativa che intenda porsi come elemento di correlazione fra area della ricerca e area dell'applicazione [...]. Esperienza non può cioè più significare solamente conoscenza ed uso appropriato di teorie e di tecniche opportune a livello individuale ma soprattutto coordinamento a livello collettivo e interdisciplinare di ricerche e di dati e quantificazione di parametri che, pur lasciando ai progettisti e ai pianificatori la responsabilità delle scelte di fondo, riducono i margini di arbitrarietà di tali scelte e offrono strumenti anche per un loro controllo esterno ...*



Un esempio significativo in tal senso è fornito dal modello 'GeoTOP' recentemente sviluppato dal Geological Survey olandese che, sulla base dei dati derivanti dai sondaggi geognostici, fornisce una visione 3D del sottosuolo fino alla profondità di 30 m dal piano campagna. La figura 6.3 riporta gli aspetti salienti del modello che suddivide il sottosuolo in milioni di celle (della dimensione 100 m × 100 m in pianta e 0,5 m in verticale) e fornisce per ognuna di esse informazioni sulle unità litostratigrafiche alle quali associa i corrispondenti parametri fisico-chimici [STAFLEU *et al.*, 2011]. In Italia, è degno di menzione il database geotecnico della Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente (ARPA) del Piemonte (<http://www.arpa.piemonte.it/>) finalizzato alla raccolta, omogeneizzazione e analisi delle informazioni sui parametri fisico-meccanici di terreni e rocce intatte e fratturate. Il database è finalizzato a molteplici scopi quali, per esempio, gli studi di fattibilità, il progetto di grandi opere, i piani regolatori comunali.

## 7. Conclusioni

I casi di studio e le considerazioni svolte nella nota evidenziano come la Geotecnica delle grandi aree sia, allo stesso tempo, una necessità improrogabile e una grande opportunità. Concorrono a renderla tale alcuni passi della Normativa, che lo richiede in maniera esplicita, i tempi sempre più ristretti concessi per la progettazione, la crescente complessità delle aree nelle quali viene richiesto di realizzare nuove opere e/o di adeguare quelle esistenti. Questa semplice constatazione mette, quindi, in luce l'impegno che la Comunità geotecnica è chiamata a mettere in campo per diventare decisiva in settori quali la pianificazione territoriale e la gestione e valorizzazione della risorsa suolo.

Con riferimento a questa nuova sfida la nota evidenzia la necessità di abbattere un antico tabù rappresentato dalla scala dello studio e dai metodi di analisi da utilizzare. In quest'ottica esistono numerosi documenti e lavori a stampa che indicano nei metodi euristici, statistici e deterministici quelli più idonei da utilizzare rispettivamente a piccola, media e grande scala. L'autore, avendo fornito un contributo in prima persona sul tema, concorda naturalmente su questa impostazione che va, però, integrata da un idoneo collegamento concettuale tra le differenti scale di analisi. Obiettivo che può essere perseguito introducendo le TRU/RAV che devono rappresentare il collante tra le scale topografiche di riferimento che, per fornire risultati incisivi ed accettati da tutti, devono basarsi su analisi che abbiano un chiaro significato fisico, siano riproducibili e valutabili nei margini di incertezza che le caratterizzano. Risulta in tale ottica indispensabile una forte sinergia tra Geotecnica e Geologia nell'ottica chiaramente delinea-

ta da Terzaghi ed alla quale si è fatto più volte riferimento nella presente nota.

Una volta individuate scale topografiche di riferimento e metodi di analisi, risulta poi fondamentale la scelta del percorso da compiere che può essere di tipo induttivo (*bottom-up*) o deduttivo (*top-down*). Il primo, sicuramente familiare alla Comunità geotecnica, è sicuramente dotato di grande rigore anche se gli studi di dettaglio a grande scala non sempre garantiscono in tempi brevi l'estensione delle conoscenze ad aree di grande ampiezza. Circostanza che, di per sé, può impedire alla Geotecnica di mostrare tutto il suo potenziale nei processi di gestione del territorio tanto cari alle Autorità competenti che richiedono sempre più spesso risposte veloci a problemi complessi. Il secondo, ancora tutto da esplorare, è caratterizzato da grandi potenzialità soprattutto se si basa, fin dall'inizio, su presupposti solidi e giuste intuizioni che, nel corso del tempo, vanno dimostrate con studi progressivamente più accurati ed a scale topografiche più dettagliate. È, tuttavia, doveroso sottolineare che questo percorso non garantisce di pervenire alle TRU/RAV che rappresentano l'ultimo indispensabile gradino da salire per dimostrare la consistenza dell'intero percorso compiuto.

Indipendentemente dal percorso privilegiato assumono, a parere dell'autore, un'importanza strategica i protocolli di analisi che devono rappresentare sia un punto di riferimento sicuro e scientificamente basato per la Comunità tecnica e sia un veicolo per la diffusione della Geotecnica delle grandi aree. La disponibilità di procedure codificate per la risoluzione di ben definite problematiche territoriali lascia intravedere la possibilità concreta di una azione sistematica e radicata per la diffusione di questi importanti strumenti di lavoro che, per svilupparsi ulteriormente, hanno bisogno di ulteriori condizioni collaterali. Tra queste, di fondamentale importanza sono *i*) l'aggiornamento/integrazione della normativa, che dovrebbe rappresentare il naturale traino per lo sviluppo e la corretta applicazione di protocolli, e *ii*) un modo finalmente al passo con i tempi di esecuzione delle indagini sul territorio.

L'aggiornamento della normativa è richiesto dalla zonazione del rischio vigente in Italia dal 2001 in quanto la progettazione delle opere di mitigazione del rischio richiede l'introduzione specifica del periodo di ritorno delle cause innescanti i fenomeni franosi. L'alternativa è rappresentata dalla progettazione di opere molto conservative che non rispettano i criteri fissati dalle analisi costi-benefici.

Per quanto riguarda le indagini, si sono ricordate nel precedente paragrafo le raccomandazioni di CREPELLANI ALLEGRETTI [1975] per valorizzare il ruolo della Geotecnica nella risoluzione di problematiche territoriali. La modernità di questi suggerimenti è evidenziata da alcuni programmi di ricerca recentemente avviati e sviluppati in alcune nazioni a livel-

lo nazionale e/o regionale (v. Par. 6.3). Programmi che possono essere agevolati dai rilevanti progressi fatti registrare, negli ultimi anni, dalla tecnologia che è destinata a sorprendere sempre di più in materia di misure di grandezze significative nell'analisi dei problemi geotecnici.

Progresso della tecnologia che solleciterà, a sua volta, la messa a punto di nuovi modelli a scale progressivamente più piccole di quelle usuali, come già accade per i modelli fisicamente basati che consentono di analizzare ampie zone di territorio con gli strumenti classici della meccanica. Ancora una volta, di fondamentale importanza per il conseguimento di risultati significativi risulteranno i già menzionati dati di input, la comprensione dei meccanismi alla base dei fenomeni oggetto di studio e la chiara comprensione dei dati di output che, laddove necessario, dovranno essere corredati dalle incertezze che, inevitabilmente, si associano ad ogni scala di analisi.

In definitiva, numerose e complesse tematiche devono essere approfondite per la crescita della Geotecnica che, per rigore e potenzialità, è in grado di fornire contributi decisivi nell'analisi di numerose tematiche territoriali. Tra queste la pianificazione territoriale e la gestione di emergenze causate da numerosi pericoli naturali, quando ricercatori e tecnici sono spesso chiamati a fornire il loro contributo nella risoluzione, in tempi brevi, di problematiche per le quali non sono ancora presenti in letteratura risposte codificate e/o qualificate. Un impegno sistematico in settori diversi da quelli tradizionali favorirà inevitabilmente la diffusione della cultura geotecnica e rappresenterà il presupposto di partenza per la creazione di importanti occasioni lavorative per le nuove generazioni.

## 8. Ringraziamenti

Vorrei, innanzitutto, esprimere il più profondo senso di gratitudine al Presidente, prof. Stefano Aversa, e al Consiglio di Presidenza dell'Associazione Geotecnica Italiana per l'invito ricevuto a svolgere la XIII Conferenza Arrigo Croce. Un analogo sentimento di gratitudine è rivolto ai proff. Arrigo Croce e Carlo Viggiani che, nel lontano 1973, furono i relatori della mia tesi di laurea sulla traversa di Caprizi e, ancora giovanissimo, mi dischiusero le porte dell'Università della Calabria. A loro desidero accennare il prof. Arturo Pellegrino, che fu promotore di tante iniziative altamente positive per me e dal quale ho tratto preziosi insegnamenti di vita e di ricerca.

Un ringraziamento tanto intenso quanto sentito va poi ai numerosissimi colleghi che hanno reso

possibile la realizzazione di un sogno, la Scuola LARAM (<http://www.laram.unisa.it> · <http://www>), con la partecipazione al Consiglio Scientifico della Scuola e con la presenza attiva ed altamente qualificata ai corsi. A loro devo l'approfondimento sistematico di tanti argomenti che hanno concorso ad accrescere, con naturalezza, il mio bagaglio personale su molteplici temi che caratterizzano la Geotecnica dell'area vasta. Tra questi mi sia consentito di ricordare almeno i componenti dell'ultimo Consiglio del quale hanno fatto parte i proff. Robin Fell, Jordi Corominas, Runqiu Huang, Felix Darve, Willy Lacerda, Cees J. van Westen, Claudio di Prisco, Manuel Pastor, Federica Cotecchia, Farrokh Nadim, Claudio Scavia e dai dr. Eric Leroi e Jonathan Godt.

La mia personale gratitudine è, con naturalezza, rivolta ai tanti giovani e meno giovani che hanno creduto in me spendendo molto del loro tempo lavorativo per lo svolgimento di studi e ricerche comuni che, sempre, sono state individuate a valle di lunghi e proficui scambi di idee. Partendo dai lontani tempi di Cosenza ringrazio, quindi, dal profondo del cuore l'ing. Giovanni Gullà, il prof. Giuseppe Sorbino, l'ing. Nicola Nocera, i proff. Settimio Ferlisi, Michele Calvello e Sabatino Cuomo, il dr. Dario Peduto, il prof. Gianfranco Fornaro, i proff. Silvio Di Nocera e Gianmaria Iaccarino, il dr. Fabio Matano e il dr. Genaro Capasso. Senza le loro elevatissime competenze scientifiche e senza il loro naturale entusiasmo a sviluppare ricerca, la quasi totalità delle idee sarebbe rimasta inespressa e ad uno stadio embrionale.

Un analogo ringraziamento va ai tanti dottori e dottorandi che si sono avvicinati all'Università di Salerno dedicandosi, con competenza, impegno ed entusiasmo ad argomenti per i quali la letteratura era spesso carente e lacunosa. Circostanza questa che li ha incuriositi ancora di più a testimonianza delle qualità scientifiche ed umane che li contraddistinguono. Tra tutti voglio ringraziare, in modo particolare, i dr. Giuseppe Maria Grimaldi, Giovanni Pisciotta, Carlo Sica, Ersilio Vitolo, Mariantonietta Ciurleo, Livia Arena, Giovanna De Chiara e Claudia Sacco.

Un sentito ringraziamento va poi a Vera e Lucia che sono per me un riferimento assoluto e mi accompagnano, da sempre, nel percorso di vita e di ricerca.

Infine, ringrazio Alberto Burghignoli, Claudio di Prisco e Federica Cotecchia per avere letto in anteprima il lavoro fornendo preziosi e graditi suggerimenti.

Alcune parti del lavoro sono state svolte con il contributo di finanziamenti del progetto PRIN 2010-2011 su "La mitigazione del rischio da frana mediante interventi sostenibili" (CUP D41J12000460001).