

Realizzazione di una piattaforma GIS per l'analisi di un esteso fenomeno cinematico in Liguria

Bianca Federici, Roberto Passalacqua, Rossella Bovolenta

DICAT: Dip. di Ingegneria delle Costruzioni, dell'Ambiente e del Territorio, Università degli Studi di Genova
Via Montallegro 1, 16145 Genova, Tel. 0103532421, Fax 0103532546
bianca.federici@unige.it, bovolenta@dicat.unige.it, passalacqua@dicat.unige.it

Sommario

Il presente lavoro illustra la realizzazione di una piattaforma GIS per l'analisi dell'esteso fenomeno cinematico che interessa un'area di circa 5 km² circostante il capoluogo di Santo Stefano d'Aveto (Liguria). Poiché il fenomeno cinematico trae origine dall'interazione fra l'acqua ed il suolo, considerata la vastità della zona interessata da movimenti lenti e diffusi, sono state raccolte tutte le informazioni disponibili su un'unica "piattaforma". La presente memoria riferisce sul modello tridimensionale del sottosuolo finora elaborato, indicandone l'utilità nelle analisi di stabilità e mostrandone i futuri sviluppi. Attualmente sono in corso nuove analisi e prove per affinarlo ulteriormente.

Abstract

The present paper deals with a 3D model in GIS (Geographic Information System), realized in order to study a diffused and continuous kinematic phenomenon in Liguria (Italy). The model integrates hydrological and geotechnical data. It allows the analysis of a large area (~ 5 km²), quite complex to schematize. The model features, its potentiality and further developments are illustrated.

1 INTRODUZIONE

La località di Santo Stefano d'Aveto, principalmente conosciuta come stazione di villeggiatura montana, sorge su un'area da sempre caratterizzata da movimenti del sottosuolo, che hanno provocato nel tempo danni ad edifici privati ed opere pubbliche in diverse parti dell'abitato. Tali effetti sono stati ulteriormente amplificati dall'espansione edilizia cui è stato sottoposto il paese a partire dagli anni '60 e che ha introdotto fattori antropici al già delicato sistema naturale.

La zona in questione è in buona parte costituita da detrito morenico caratterizzato da estrema eterogeneità dei materiali presenti (grossi trovanti, lenti e tasche d'argilla, sabbia) e ricco di acque sotterranee in buona parte dell'anno. La presenza nel sottosuolo di zone a differenti permeabilità porta ad una circolazione idrica suddivisa localmente in filetti idrici e non ad una falda a profondità costante. Per tale motivo, verificandosi un costante movimento verso valle del deposito morenico (soprattutto a contatto con il substrato roccioso) il cui motore principale è l'acqua, si possono avere aree a velocità differente. Questa eterogeneità di permeabilità a livello locale e, quindi di spostamento, è testimoniata dai cedimenti, con conseguenti fessurazioni, di diverse opere. Da non trascurare sono anche i cedimenti del piano di campagna conseguenti a fenomeni di consolidazione che, per l'eterogeneità del sottosuolo, risultano di differente entità anche in punti vicini tra loro.

La consistenza dei danni, e la notevole diffusione all'interno di tutta l'area comunale, ha spinto amministrazioni condominiali e la Comunità Montana a promuovere e finanziare perizie tecniche e studi idro-geologici da parte di enti pubblici e privati per monitorare i danni e per promuovere soluzioni al fine di eliminare o, almeno ridurre, l'entità dei dissesti futuri. Infatti sono state eseguite indagini geognostiche e prove sismiche per caratterizzare il terreno ed il sottosuolo, monitoraggio di durata pluriennale per valutare il grado di mobilità della frana, censimenti sul grado di lesione degli

edifici ed altre operazioni di salvaguardia del territorio. Nella parte superiore del paese e nella zona ove è ubicata la chiesa è riscontrabile un movimento di massa che si propaga a velocità costante verso valle, mentre nella zona centrale ed in quella adiacente a Santo Stefano d'Aveto, il corpo detritico pare invece aver esaurito il suo movimento.

Dal momento che il fenomeno cinematico ha le sue origini nell'interazione fra l'acqua ed il suolo, e considerata la vastità della zona interessata da movimenti lenti e diffusi, si è ritenuto opportuno creare un modello tridimensionale su piattaforma GIS in cui fossero individuate oltre al profilo topografico, lo spessore di coltre e la posizione della linea di falda. A tale scopo sono state raccolte tutte le informazioni disponibili, rendendole operative in un unico ambiente di lavoro, integrandole con dati geofisici ed idrologici aggiuntivi, ottenuti mediante una campagna sperimentale appositamente condotta. E' stato impiegato il GIS *free* ed *open source* GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) per poter distribuire il risultato del lavoro agli enti interessati senza essere legati a licenze proprietarie. Inoltre, utilizzando tale GIS *open source* è possibile analizzare direttamente gli algoritmi e le procedure esistenti, ed integrare funzionalità aggiuntive che possono essere restituite alla comunità con le stesse caratteristiche di riusabilità.

2 INFORMAZIONI RELATIVE AL SUOLO E SOTTOSUOLO

Informazioni riguardanti il suolo ed il sottosuolo sono state desunte da diverse campagne sperimentali che hanno interessato l'area circostante il paese di Santo Stefano d'Aveto, effettuate da studi professionali ed Enti pubblici dagli anni 90 ad oggi.

Sono stati effettuati rilievi di superficie per la ricostruzione dei meccanismi di instabilità. Inoltre sono stati misurati gli spostamenti di oltre trenta capisaldi di misura opportunamente posizionati, attraverso monitoraggi topografici e GPS, periodici ma non automatizzati. Sono anche disponibili dati di interferometria satellitare per un'analisi delle velocità di bersagli radar (Permanent Scatterers) rilevabili sul corpo di frana dal satellite ERS per il periodo di osservazione 1992-2000, e dal satellite ENVISAT per il periodo 2002-2008.

Per quanto riguarda le indagini profonde, sono state effettuate indagini geognostiche e prove geotecniche di laboratorio, oltre a campagne di misure inclinometriche e piezometriche su un elevato numero di fori di sondaggio in modo da avere un quadro più realistico possibile della natura e spessore dei materiali coinvolti nel movimento, data la sua complessità ed estensione. Inoltre sono state effettuate indagini geofisiche mediante sismica a rifrazione e riflessione e MASW 2D; queste ultime, di minor dettaglio rispetto alle indagini geotecniche, sono prove indirette e, solitamente, non invasive che consentono di ricostruire il modello del sottosuolo, analizzando la variazione spaziale di alcune proprietà caratteristiche dello stesso.

Da tali campagne risulta che il sottosuolo è sostanzialmente costituito da:

- coltre detritica: matrice sabbioso limosa con blocchi plurimetrici dispersi;
- substrato: argilloscisti grigio scuro (Flysch di Ottone) e dal complesso di Monte Veri.
-

3 NUOVE INDAGINI GEOFISICHE PER L'INDIVIDUAZIONE DELLO STRATO DI COLTRE

Per una migliore caratterizzazione dell'area in esame sono state condotte nell'ambito del presente studio ulteriori indagini geofisiche volte a definire l'altezza di coltre soggetta a movimento attraverso misure di microtremore, che consistono nel ricavare il valore della frequenza fondamentale della coltre detritica in corrispondenza di ogni punto di misura.

In particolare, è stata effettuata una campagna preliminare di acquisizione di rumore ambientale considerando numerosi punti misura posizionati in modo da coprire uniformemente l'area considerata per l'analisi. Quindi è stata applicata la tecnica Nakamura (1989) per definire in modo preliminare le frequenze caratteristiche di ciascun sito necessarie per caratterizzare gli effetti di amplificazione eventualmente presenti. Infine, è stata installata una micro rete sismica, operante per un periodo sufficiente a raccogliere un database completo di segnali sismici attraverso cui valutare gli effetti di amplificazione locale presenti.

Mediante questa campagna è stato possibile realizzare un modello geologico e geotecnico per la caratterizzazione dell'area indagata. Il modello è stato individuato in termini di spessore del corpo detritico, di frequenza di risonanza e di velocità delle onde di taglio V_s dell'area investigata; tali parametri puntuali sono stati poi interpolati in ambiente GIS per la creazione di mappe distribuite (Figure 1 e 2). Nel seguito si descrive in maggior dettaglio tale campagna di misure.

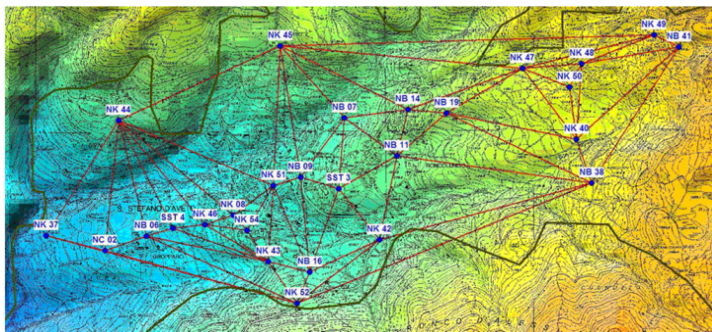


Figura 1 – Posizione dei punti di misura di microtremore e rete TIN utilizzata per la creazione di mappe di frequenza e di spessore del detrito.

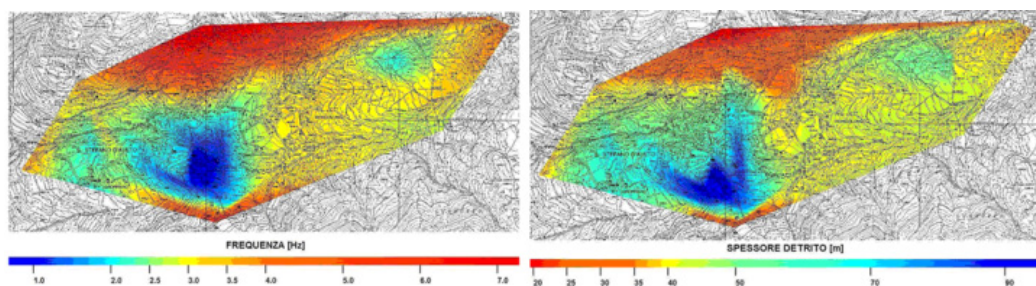


Figura 2 – Mappe delle frequenze di risonanza (a sinistra) e dello spessore del detrito (a destra).

3.1 Misure di rumore ambientale

Per determinare lo spessore della coltre è stata applicata la tecnica Nakamura (1989). Nota la frequenza fondamentale F_0 e la velocità media delle onde di taglio V_s dei livelli di coltre sovrastanti il substrato, è possibile stimare lo spessore H di tali coltri dalla semplice relazione:

$$H = V_s / 4F_0 \quad [1]$$

Alternativamente, noti gli spessori del materiale detritico sovrastante il bedrock, ricavati da indagini preesistenti o dai modelli di velocità ottenuti mediante inversione tomografica, è possibile ricavare la velocità media V_s del materiale detritico che costituisce il corpo franoso. Nel caso in questione, il numero totale di misure effettuate è stato 68. A causa di alcune problematiche connesse all'installazione della strumentazione utilizzata, le misure utilizzabili sono risultate 28 e per ciascuna si è cercato di individuare, dove possibile, la frequenza di risonanza del deposito basandosi, per la scelta del picco significativo, anche sulle evidenze geologiche disponibili.

3.2 Prospezione sismica con misure di rumore ambientale su array

I sensori sono stati disposti secondo una geometria a stella sul piazzale che collega la piazza del comune alla frazione Casette. La registrazione del rumore ha avuto una durata di 30 minuti, ad una

frequenza di campionamento di 8 ms. La distanza massima dell' *array* è risultata essere di 45.62 m, mentre la minima distanza inter – geofonica di 22.17 m.

Le acquisizioni sono state elaborate mediante la tecnica *f – k Beam Forming e High Resolution*, basata sullo studio del campo d'onda nel dominio frequenza – numero. Contemporaneamente sono state determinate le direzioni di provenienza dei fronti d'onda che in un dato intervallo di tempo hanno attraversato l' *array* e la loro *slowness* in funzione della frequenza. Il numero dei sensori installato e la loro distribuzione spaziale ha permesso di esprimere la cosiddetta funzione di risposta dell' *array* in termini di valori di *slowness* osservabili nelle diverse direzioni e senza distorsioni.

Attraverso una procedura di *picking* manuale è stata ricavata la curva di dispersione che meglio analizza i massimi di coerenza rinvenuti nel diagramma frequenza – lentezza, per ciascuna coppia di valori. È stata quindi eseguita l'inversione della curva di dispersione per ottenere il modello di velocità delle onde S. Il modello è stato ottenuto confrontando la curva di dispersione sperimentale ottenuta dall' *array* con quella teorica, scegliendo, tra i vari modelli elaborati, quello con la minimizzazione degli scarti minore. Il modello è risultato affidabile per i primi 18 metri di profondità poiché la risposta dell' *array*, in termini di frequenza, risultava essere ottimale per frequenze comprese tra i 5 e i 15 Hz.

Per raggiungere risultati affidabili a profondità maggiori occorre una distanza massima dell' *array* superiore, ma ciò non è stato possibile a causa dell'estensione limitata del piazzale su cui è stato eseguito.

3.3 Calcolo dello spessore della coltre detritica e di V_s

Il primo passo per la realizzazione del modello geologico e geofisico dell'area di Santo Stefano d'Aveto e, quindi del calcolo dello spessore della coltre detritica, del profilo di velocità delle onde S e la frequenza di risonanza a essa relativi, è stato recuperare tutti i dati già disponibili da indagini pregresse di cui 8 indicavano la profondità del substrato e di conseguenza lo spessore della coltre soprastante.

Per questi 8 punti, conoscendo la frequenza di risonanza ottenuta dalle misure di rumore ambientale e lo spessore ricavato dai sondaggi, è stato possibile effettuare il calcolo speditivo della velocità delle onde di taglio V_s . Il valore di V_s utilizzato per il calcolo dello spessore del sedimento soffice è confrontabile con i dati delle indagini pregresse, Masw e Remi.

4 ASPETTI IDROLOGICI E VALUTAZIONE DEL LIVELLO DI FALDA

L'analisi idrologica del sito si è articolata in due fasi. Nella prima è stata effettuata una campagna di misure di portata con lo scopo di studiare l'interazione tra acqua superficiale ed acqua sotterranea, mentre nella seconda si è cercato di interpretare, mediante semplici modelli, sia il sistema di drenaggio alveato che quello sotterraneo, con particolare riguardo alla determinazione del possibile andamento del livello di falda da inserire nel modello tridimensionale.

A tale scopo è stato necessario acquisire una maggior conoscenza della zona analizzando la cartografia digitale e confrontandola con sopralluoghi, quindi incorporare i risultati di studi precedenti ed, infine, effettuare misure di portata superficiali nei corsi d'acqua della zona.

Per brevità ci si sofferma soltanto sulla ricostruzione del possibile livello di falda e sul modello semplificato adottato.

4.1 L'idrologia della regione di Santo Stefano d'Aveto

Da un punto di vista idrologico, si possono osservare alcune singolarità:

- la presenza di due corsi d'acqua quasi paralleli (il Fossato Grosso a nord, ed il Rio Freddo a sud), separati dal corpo della morena glaciale;
- la deviazione del Rio Freddo, dovuta ad una paleofrana: essa dà luogo alla "bretella" che attraversa l'abitato di Santo Stefano per unirsi a Fossato Grosso;

- l'esistenza di piccoli corsi d'acqua "pensili" che attraversano il corpo della morena; il loro nome deriva dal fatto che presentano un alveo poco inciso e a volte posizionato ad una quota superiore a quella di zone limitrofe;
- all'estremità ovest della morena glaciale, il sistema di acque superficiali e sotterranee trova un unico recapito P evidenziato in figura 3.

Le misure eseguite nel corso della presente ricerca, unite ai risultati acquisiti in precedenti studi, hanno permesso di esaminare l'idrologia della regione di Santo Stefano d'Aveto prendendo in considerazione prima il sistema di drenaggio superficiale e poi quello sotterraneo.

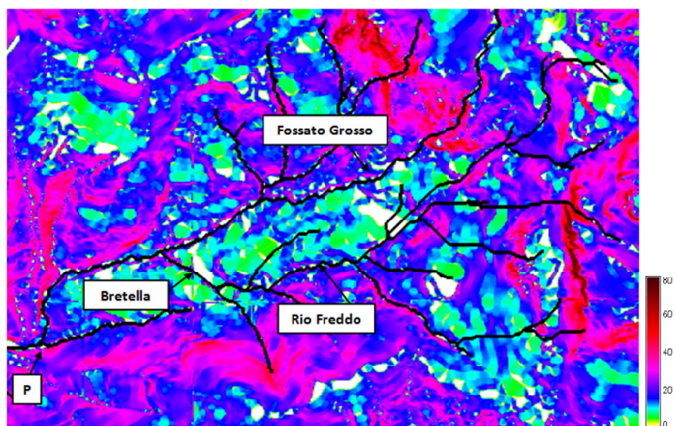


Figura 3 – Mappa delle pendenze (in gradi) e reticolo idrografico.

4.2 Deflusso alveato

Al fine di interpretare il deflusso alveato si è scelto di utilizzare il modello dell'invaso lineare applicato al bacino del Rio Freddo.

Le misure di portata effettuate nell'ambito della presente ricerca, oltre ad essere utili per la taratura del modello, hanno permesso di quantificare lo scambio tra il torrente e la falda in corrispondenza dell'attraversamento dell'abitato di Santo Stefano d'Aveto.

Per determinare i parametri caratterizzanti il bacino in esame, non avendo a disposizione misure di portata in regime d'esaurimento, è stato necessario considerare che solo una parte di pioggia (pioggia netta) concorre alla formazione della portata in entrata nel serbatoio.

Nell'ottica di impostare un bilancio idrico della zona, le operazioni appena descritte hanno permesso di modellare il deflusso alveato del Rio Freddo e di caratterizzare il suo bacino tramite opportuni parametri.

La tecnica usata per il Rio Freddo può essere sicuramente estesa al bacino di Fossato Grosso.

4.3 Deflusso sotterraneo

Di particolare interesse per lo studio dell'esteso fenomeno cinematico risulta l'analisi del deflusso sotterraneo. La morena glaciale di Santo Stefano è sede di una falda idrica i cui effetti si manifestano attraverso movimenti del terreno, osservati in passato ed anche in tempi recenti.

Per effettuare verifiche di stabilità del terreno occupato dalla morena glaciale occorre individuare la parte di terreno occupata dall'acqua. In modo particolare occorre modellare il movimento dell'acqua nella falda per cercare di stimare almeno in prima approssimazione il suo spessore.

L'indagine sul posto, le misure di portata e l'esame di precedenti studi hanno permesso di giungere ad alcune conclusioni a riguardo dei rapporti idrici tra la falda e l'esterno.

La falda è alimentata dalla pioggia, da una piccola porzione del bacino idrografico di monte, e dall'apporto, in alcune porzioni limitate, dei due torrenti principali (in particolare la parte più alta del Fossato Grosso, all'altezza di Rocca d'Aveto, e la parte del Rio Freddo che attraversa l'abitato di Santo Stefano, la cosiddetta "bretella"). Concorrono a drenare la falda alcuni brevi tratti dei due rii principali prima della loro confluenza, e principalmente il tratto del Fossato Grosso che delimita la morena glaciale a ovest, là dove la morena finisce.

E' stato assunto, per semplicità di analisi, che la morena glaciale abbia una forma assimilabile a quella di un parallelepipedo, di lunghezza pari a 3000 metri e larghezza di 450 metri inclinato verso ovest con la stessa pendenza media del substrato della falda (circa il 15%). Si è ipotizzato, inoltre, che l'unica alimentazione alla falda sia rappresentata dall'acqua di pioggia, e che l'uscita sia localizzata esclusivamente al suo margine occidentale, trascurando quindi gli apporti positivi e negativi dei rii che la costeggiano e che l'attraversano (un tratto del Rio Freddo, il Rio Airon ed il rio pensile). Si è analizzato il moto nella falda come se fosse schematizzabile nella forma di onda cinematica. Il detrito morenico è stato considerato come un ammasso poroso omogeneo ed isotropo a cui è possibile applicare la legge di Darcy. Per quanto riguarda le condizioni al contorno, si è ipotizzato che al margine superiore la falda abbia spessore nullo. Il modesto contributo delle portate sotterranee provenienti da monte può essere aggiunto utilizzando il principio di sovrapposizione degli effetti.

Si è deciso di sollecitare il modello matematico con una sequenza molto lunga di anni tutti uguali, formati dalla successione delle 365 piogge giornaliere registrate per il 2010 dal pluviografo di Santo Stefano. In questo modo si supera anche il problema delle condizioni iniziali, che vengono assunte come quelle di terreno asciutto.

Per scegliere il coefficiente di permeabilità da utilizzare nella determinazione dell'andamento della falda è stato necessario sovrapporre il livello della falda al substrato e confrontarlo con alcune "sezioni di controllo".

5 PIATTAFORMA GIS

I dati conosciuti e le analisi effettuate nel corso del presente lavoro sono stati inseriti su un'unica "piattaforma" GIS mediante il software GRASS 6.4 (*GRASS Development Team, 2010*), in modo tale da consentire un'immediata conoscenza della zona in esame e delle sue criticità.

In particolare, è stata importata la cartografia tecnica e tematica di base e le informazioni derivate dalle campagne di misura, organizzandole in più piani tematici. Sono state effettuate analisi della morfologia del territorio ed analisi di bacino, utili allo sviluppo dell'analisi idrologica. Quindi è stato realizzato il modello tridimensionale del substrato detritico e del livello di falda, attraverso analisi approfondite dei metodi di interpolazione ottimali per riprodurre la superficie in esame.

5.1 Importazione della cartografia e di informazioni aggiuntive

Dopo aver impostato un ambiente di lavoro (*location*) nel sistema di riferimento Roma40 e proiezione cartografica Gauss-Boaga, coerente con la cartografia attualmente disponibile in Regione Liguria, sono stati importati i seguenti tematismi:

- Carta Tecnica Regionale (CTR) in scala 1:5000;
- Modello Digitale del Terreno (DTM) con risoluzione 5 metri;
- Carta dell'uso del suolo in scala 1:25000;
- Carte IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) in scala 1:10000;
- Carta Geologica Regionale (CARG) in scala 1:25000;
- Carte delle isolinee relative agli spostamenti elaborati in direzione E-W e quelli relativi alla componente verticale derivanti dall'interferometria satellitare con il satellite ENVISAT, opportunamente georeferenziate.

In seguito alle campagne di misura, è stato importato il perimetro di frana, la posizione e i risultati delle misure di microtremore, le sezioni in cui sono state effettuate le misure di portata e la stazione di presa della centrale idroelettrica.

5.2 Analisi della morfologia del territorio

E' stata effettuata un'analisi della morfologia del territorio ricavando, dal DTM, la mappa dell'esposizione e quella della pendenza. La prima mette in evidenza come la zona di Santo Stefano e quella della morena detritica siano rivolte principalmente verso ovest, mentre il versante a nord della coltre detritica sia rivolto prevalentemente verso sud. La seconda evidenzia come le maggiori pendenze (colore rosso) coincidano con le principali vette della zona (Gropo Rosso e Monte Maggiorasca) mentre Santo Stefano d'Aveto e la morena detritica si collocano su pendenze che si aggirano intorno ai dieci gradi.

Quindi, è stata effettuata un'analisi di bacino per individuare la mappa di accumulazione, i principali bacini idrografici ed il corrispondente reticolo idrografico, utilizzando il metodo di Horton–Strahler.

Le elaborazioni sono state svolte con risoluzione spaziale pari a 5m.

5.3 Modello tridimensionale della coltre e del livello di falda

Infine è stato creato un modello tridimensionale dello spessore della coltre detritica, del profilo di velocità delle onde secondarie, della frequenza di risonanza ad esse relativi e dell'andamento della falda.

A partire dai risultati puntuali della campagna di misure di rumore ambientale, descritta nel par. 3, sono stati utilizzati diversi metodi di interpolazione ed è stato individuato in maniera critica il più idoneo a "ricostruire" la variabilità spaziale persa con il campionamento puntuale.

I metodi di interpolazione applicati sono stati TIN (*Triangulated Irregular Network*), IDW (*Inverse Distance Weighted*) e *spline*, verificando anche l'influenza dei valori assegnati ai loro parametri principali. Non si è utilizzata la tecnica *kriging* poichè richiede una fase di studio piuttosto lunga, accurata e dettagliata per creare una funzione di covarianza che approssimi al meglio la distribuzione dei dati e, per esperienza personale, il risultato finale non si discosta molto da una buona analisi effettuata con la tecnica *spline*.

Il metodo di interpolazione IDW implementato in GRASS con il comando *v.surf.idw* ha mostrato un comportamento anomalo, tendendo ad uniformare i dati anche laddove presentavano una forte discontinuità, indipendentemente dal valore del parametro *npoints* che indica il numero di punti osservati che concorrono al calcolo del punto incognito. Inoltre, il valore massimo dello spessore della coltre risultante dall'interpolazione era per esempio pari a 52 m, molto inferiore al valore massimo campionato di 90 m. Risultati attendibili, invece, si sono osservati utilizzando il comando *r.surf.idw*.

Il metodo di interpolazione *spline* implementato in GRASS è il *Regularized Spline with Tension* (comando *v.surf.rst*, Mitasova et al. 1993) mentre l'interpolazione TIN è stata ottenuta mediante il comando *r.surf.nnbathy*, non presente nella versione base del software ma disponibile tra i moduli aggiuntivi (GRASS Add-On Wiki, 2010).

Per stabilire quale tecnica di interpolazione utilizzata generasse una superficie interpolante più simile a quella reale, si è interpolato trascurando alcuni punti campionari meno significativi, ossia non rappresentativi di picchi o discontinuità, e verificando in essi la congruenza tra valore interpolato e valore campionato.

Per quanto concerne la realizzazione del modello tridimensionale del substrato, dopo numerose prove, si è individuato nell'IDW il metodo che maggiormente sembra adattarsi alla distribuzione dei dati campionari generando una superficie interpolante realistica (Figure 4).

Il modello tridimensionale del possibile livello di falda è stato ricostruito all'interno della coltre detritica a partire dal profilo longitudinale di falda, ottenuto mediante lo schema semplificato descritto nel par. 4; tale profilo è stato proiettato in direzione ortogonale mediante tassellazione di Voronoi utilizzando il comando *v.surf.idw* quale interpolatore "al più vicino" (*nearest neighbour*), ponendo il parametro *npoints* pari ad 1.

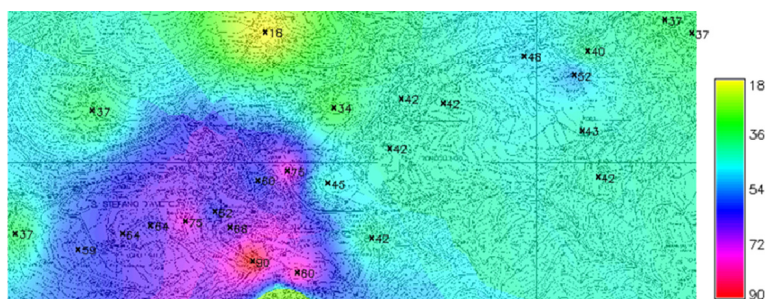


Figura 4 – Modello tridimensionale dello strato detritico (ottenuto mediante IDW con $npoints=6$).

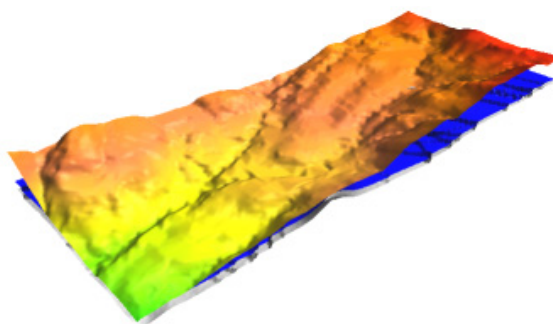


Figura 5 – Vista 3D dell'area soggetta a cinematiso diffuso (in azzurro è rappresentato il piano di falda, in grigio il piano di interfaccia coltre-substrato roccioso).

6 APPLICAZIONE DEL MODELLO 3D PER L'ANALISI DEL FENOMENO CINEMATICO

Il modello tridimensionale descritto è stato impiegato per effettuare analisi di stabilità bidimensionali mediante il codice *Slide*® [Rocscience, 2010]. Tale programma commerciale consente di svolgere analisi all'equilibrio limite globale, permettendo così di analizzare frane per scorrimento potenziali o reali. In generale, l'uso di tale programma è piuttosto semplice, ma particolare cura deve essere dedicata alla realizzazione del modello. Ovviamente la descrizione della geometria del problema è piuttosto onerosa qualora la sezione analizzata sia estesa ed articolata. In tal caso, il poter disporre di un modello tridimensionale come quello precedentemente descritto diviene particolarmente utile.

Per una generica sezione del modello tridimensionale (par. 5.3), si è interrogato il profilo topografico, la mappa dello spessore della coltre e quella dell'andamento della falda, estraendo i relativi profili altimetrici. Essi sono stati poi facilmente importati in *Slide*®, così da individuare superfici di potenziale scivolamento ed i relativi coefficienti di sicurezza, definendo così zone di maggiore criticità.

Ad esempio, all'interno dell'esteso fenomeno cinematico in atto a Santo Stefano d'Aveto è stata considerata una sezione di circa 700 metri che attraversa la parte alta dell'abitato e localizzata in una zona caratterizzata da spostamenti in direzione E-W piuttosto elevati (Figure da 6 a 8). Per verificare se il modello permette di cogliere le reali criticità dell'esteso fenomeno di Santo Stefano d'Aveto sono stati usati come termine di paragone i dati disponibili da interferometria satellitare (Figura 9). Le seguenti brevi considerazioni possono essere fatte in merito a tali prime analisi:

- i metodi all'equilibrio limite globale non rappresentano l'approccio più corretto in questo caso, in quanto trattasi di un esteso fenomeno cinematico e non di un meccanismo di rottura governato dalla formazione di banda di taglio;

- il volume esaminato rappresenta una “piccola” porzione (malgrado la sezione abbia lunghezza pari a 700m) dell’intera massa soggetta a movimento;
- le informazioni relative alle caratteristiche del sottosuolo sono scarse, indicative più che altro degli strati superiori;
- un confronto diretto fra i risultati ottenuti dalla tecnica di interferometria satellitare (tecnica peraltro discussa sotto molti punti di vista) con i risultati ottenuti dall’analisi di stabilità statica eseguita con Slide[®] non è corretto, in quanto si mettono in relazione movimenti in atto con potenziali superfici di scorrimento.

Malgrado ciò le analisi effettuate risultano incoraggianti ed il modello realizzato appare un utile ausilio.

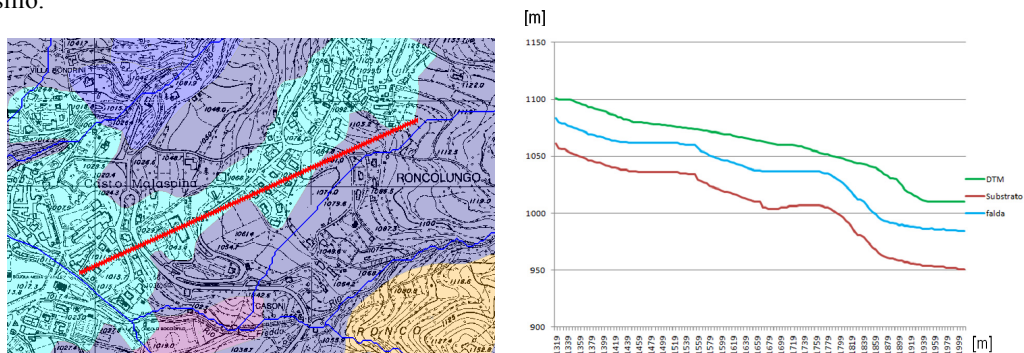


Figura 6 – Posizione della sezione prescelta (in rosso, a sinistra) e andamento del profilo topografico, del livello di falda e del substrato roccioso lungo essa (a destra).

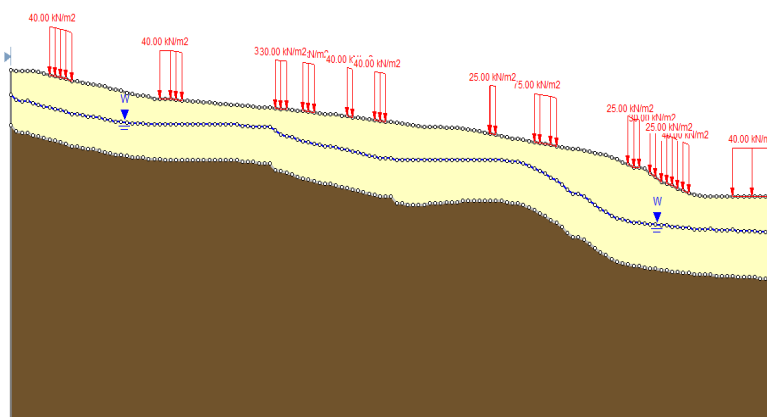


Figura 7 – Sezione di interesse riportata in Slide[®]

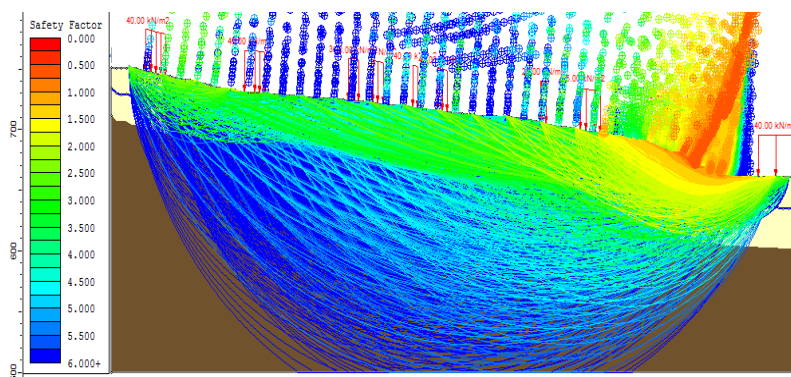


Figura 8 – Risultati delle analisi di stabilità con Slide®

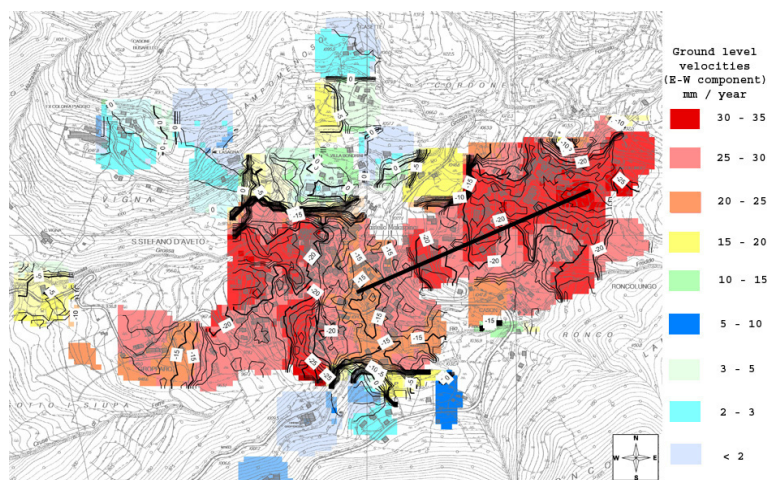


Figura 9 – L'interpretazione dei dati satellitari ENVISAT (componente orizzontale di movimento in direzione E - W) e, in nero, il profilo della sezione sottoposta a verifica di stabilità.

7 ULTERIORI SVILUPPI

L'approccio innovativo che si ritiene importante introdurre, nel proseguire l'attività di ricerca qui illustrata, consiste nel considerare il carattere evolutivo delle precipitazioni, aggiornando i dati di pioggia incidente con quanto rilevato sistematicamente dalla rete pluviometrica distribuita sul territorio. In tal modo, il modello permetterebbe previsioni dell'innescio dei fenomeni franosi, simulando scenari meteorici futuri che considerino le storie pluviometriche pregresse ed attuali.

Affinché una modellazione fisico-meccanica dei cinematismi di versante riesca a cogliere il principio causa-effetto (pioggia → frana), per le coltri di detrito è necessario individuare una procedura che corredi l'intensità di pioggia incidente alla quantità d'acqua che si infila nel terreno in loco. Infatti, secondo l'approccio tipicamente geotecnico, l'aumento di pressione dell'*acqua interstiziale* al crescere del livello di falda, riduce progressivamente la *resistenza efficace mobilizzata* nel terreno che, divenendo inferiore ad un determinato valore limite, dà luogo al dissesto gravitativo. Tale condizione emerge quando il rapporto a secondo membro della seguente relazione assume valore minore dell'unità:

$$F_s = \frac{c' + z \cdot \cos^2 \theta \cdot (\gamma - m \cdot \gamma_w) \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} \quad [2]$$

La [2] definisce (Skempton, De Lory, 1957) il *coefficiente di sicurezza* F_s alla generica profondità 'z' di un pendio indefinito, con acclività θ , mettendo in relazione la sua resistenza limite (a numeratore) con quella mobilizzata dalle forze spingenti (a denominatore); in essa, il terreno è caratterizzato dai parametri di *resistenza a taglio in condizioni efficaci* ($c' - \phi'$) e dal suo peso dell'unità di volume (γ), mentre il livello di falda (cioè la colonna d'acqua interstiziale di peso unitario γ_w) è assegnato dal fattore 'm'. Utilizzando la [2] in modo spazialmente distribuito sull'area in esame, è possibile valutare se esiste, in ciascuna posizione planimetrica, una profondità 'z' (incrementata fino a raggiungere eventualmente lo strato locale stabile di base) ove è superata la condizione di equilibrio limite, cioè $F_s < 1$.

Questa tecnica d'analisi è realizzabile in ambiente GIS, in quanto permette all'utente di implementare *macro* o *procedure* personalizzate.

Riguardo alla sequenza operativa, in estrema sintesi, si deve procedere a:

- predisporre il layer tematico delle acclività locali θ , discretizzato in celle unitarie (*pixels*);
- suddividere l'intera area in poligoni, secondo un processo di *Land Tessellation*, ed associare ad ognuno di essi una omogenea caratterizzazione fisico-meccanica del terreno (porosità, coefficiente di permeabilità, peso unitario, resistenza a taglio);
- intersecare i poligoni con le celle unitarie, per assegnare automaticamente a ciascuna di quest'ultime i parametri caratteristici del terreno in posto.

Per correlare le storie meteoriche agli innalzamenti di falda si può introdurre un modello idrologico, relativamente semplice, basato sull'utilizzo del parametro sintetico CN (*Curve Number*). Questo, proposto negli anni '70 dall'S.C.S. statunitense (*Soil Conservation Service*, 1972 – 1975), permette di valutare la quota parte di pioggia incidente al suolo che defluisce per ruscellamento superficiale, mentre la quota restante infiltra nel terreno. Per una più completa descrizione del CN si rimanda a Passalacqua (2002), report tematico nell'ambito del quale tale modello idrologico è già stato implementato. Con esso è possibile effettuare un bilancio idrologico continuo, considerando l'acquifero sub-superficiale come un serbatoio a svuotamento continuo regolato da gradiente, permeabilità ed evapotraspirazione locali, che riceve alimentazione dalle piogge incidenti (Passalacqua, Baretto, 2003). Mantenendo aggiornati i dati di pioggia, gli attuali livelli di falda risulteranno da una complessa storia di azioni meteoriche.

Per completare la descrizione della sequenza operativa indicata sopra, è necessario:

- assegnare i valori dei CN ai centroidi georeferenziati delle celle unitarie;
- implementare una procedura automatica in ambiente GIS che, per ogni cella unitaria, esegua il descritto bilancio idrologico, valuti le conseguenti evoluzioni di falda e verifichi il superamento, o meno, delle condizioni di equilibrio limite.

L'ultimo punto rappresenta il vero e proprio algoritmo dinamico, che introduce le innovative capacità di analisi e previsione di fenomeni franosi, su vasta scala, dovuti ad eventi meteorici. L'implementazione della procedura per l'analisi delle oscillazioni di falda e per le successive analisi di stabilità del corpo frana è attualmente in svolgimento.

8 CONCLUSIONI

Nel corso della presente ricerca sono state raccolte tutte le informazioni disponibili relative alla zona di Santo Stefano d'Aveto (indagini geognostiche e geofisiche, monitoraggio geotecnico, topografico e GPS e dati ottenuti con la tecnica di interferometria satellitare) su un'unica "piattaforma" GIS ed è stato così possibile gestire dati *raster* e vettoriali, sviluppare indagini, elaborare immagini e visualizzare gli attributi dei dati. La piattaforma è stata, quindi, arricchita dall'interpretazione dei risultati di prove geofisiche, che hanno permesso la realizzazione di un modello tridimensionale dello spessore della coltre detritica, nonché da un'analisi idrologica che ha

consentito di individuare i bacini ed il reticolo idrografico della zona e da uno studio del deflusso sotterraneo che ha reso possibile, mediante un semplice modello, di ottenere l'andamento della falda entro la coltre detritica. La "piattaforma" creata in GRASS rappresenta un utile strumento di lavoro poiché consente di ottenere molte informazioni, a tavolino, mediante la semplice sovrapposizione di diversi *layer*. Tale funzione si rivela estremamente efficace e rapida qualora si vogliano analizzare porzioni di territorio estese e complesse. Con il semplice tracciamento di una retta in GRASS e selezionando i *layer* necessari è possibile ottenere, in maniera automatica ed immediata, l'andamento della superficie topografica, del livello di falda e del substrato di un'ampia porzione di territorio. Il presente lavoro costituisce l'inizio di un percorso più lungo; il modello sviluppato potrà sicuramente essere arricchito da ulteriori dati che si renderanno disponibili e da nuove analisi in modo tale da diventare più aderente alla realtà.

Dal momento che, come già evidenziato, il fenomeno cinematico è fortemente influenzato dall'acqua presente nel sottosuolo, si ritiene che l'analisi delle oscillazioni di falda mediante il metodo del Curve Number CN (Soil Conservation Service – United States Department of Agriculture, 1972) potrebbe risultare particolarmente significativa e quindi, come diffusamente descritto nel precedente cap. 7, è proprio in tale direzione che si sta orientando la presente ricerca. Seppur ulteriormente sviluppabile, si ritiene che allo stato attuale, il modello realizzato rappresenti uno strumento idoneo per l'inquadramento dell'esteso fenomeno cinematico di Santo Stefano d'Aveto e possa costituire senza dubbio un valido supporto per la pianificazione territoriale ed urbanistica. La realizzazione di modelli tridimensionali in GIS consente un'analisi territoriale integrata ed orienta ad un approccio più maturo ed approfondito nella gestione del territorio e nella progettazione degli interventi.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Settore Sistemi Informativi e Telematici della Regione Liguria, nella persona del dirigente Dott.ssa Pasetti, per aver messo a disposizione la cartografia tecnica e tematica. Si ringraziano inoltre i laureandi Marco Dasso, Federica Basso e Marta Venzano per il loro prezioso lavoro.

Bibliografia

- GRASS Add-On Wiki (2010). http://grass.osgeo.org/wiki/GRASS_AddOns
- GRASS Development Team (2010). Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 6.4.0. Open Source Geospatial Foundation. <http://grass.osgeo.org>
- Mitasova, H. and Mitas, L. (1993), "Interpolation by Regularized Spline with Tension: 1. Theory and Implementation". *Mathematical Geology*, 25 (6), 641-655.
- Nakamura Y. (1989), "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface", Report of the Railway Technical Research Institute (RTRI), Vol. 30 - No.1, Tokyo, Japan.
- Passalacqua R., Baretto A. (2003): "Landslides and rockfalls predictions by G.I.S. in Western Liguria", Proc. Int. Conference on Fast Slope Movements Prediction and Prevention for Risk Mitigation (FSM2003), Napoli, 11-13 Maggio, L. Picarelli Ed. (Pàtron), ISBN 8855526995, pp. 421-429.
- Passalacqua R. (2002): "Vulnerabilità territoriale da frane e crolli in roccia", Prog. UE INTERREG II – Cooperazione transfrontaliera Italia-Francia: Progetto GE.R.I.A., Dossier Tematico n° 8, Collana Territorio e Ambiente, Edizioni del Delfino Moro, Albenga (SV), Dicembre 2002, ISBN 88-88397-05-1, pp. 1-37.
- Rocscience Inc. (2010), "Slide©: 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes", ver. 6.0, 31 Balsam Avenue, Toronto, ON, Canada, M4E 3B5.
- Skempton A.W., De Lory F.A. (1957), "Stability of natural slopes in London Clay", in: Proc. 4th Int. Conf. on Soil Mechanics & Foundation Engineering, vol. 2, pp. 378-381.
- Soil Conservation Service (1972), "Hydrology", in: National Engineering Handbook, sec. 4, U.S. Dept. of Agriculture, Washington D.C.
- Soil Conservation Service (1975), "Urban hydrology for small watersheds", Tech. Rel. No. 55, U.S. Dept. of Agriculture, Washington D.C.