

***ELABORAZIONE DI CARTE DI PERICOLOSITÀ
GEOLOGICA CON METODI STATISTICI E
DETERMINISTICI ED ANALISI COMPARATIVA DEI
RISULTATI***

Dr. Ing. Erminia Raciti

Tutor: Dr. Vittorio Chiessi

Co-tutor: Renato Ventura

ABSTRACT

ELABORAZIONE DI CARTE DI PERICOLOSITÀ GEOLOGICA CON METODI STATISTICI E DETERMINISTICI ED ANALISI COMPARATIVA DEI RISULTATI

La valutazione della pericolosità e del rischio connesso a fenomeni naturali è un obbiettivo molto importante, sia dal punto di vista scientifico che dal punto di vista tecnico.

L'Italia è una nazione molto esposta al rischio di instabilità dei versanti. Una frana è il risultato di una grande varietà di processi di natura geologica, geomorfologica, meteorologico-climatica, o anche antropica. I fattori che, interagendo, possono influire sulla instabilità dei versanti possono essere molto numerosi: la litologia, la struttura, la densità di drenaggio, l'acclività, l'uso del suolo, la geomorfologia, la presenza di una rete stradale, e molti altri, dunque è necessario ricavare le informazioni di interesse (sia con metodi tradizionali, sia avvalendosi delle più moderne tecnologie) e conoscere l'influenza che ciascuno di essi può avere.

L'obbiettivo di questo lavoro è stato quello di rendere disponibili alcuni strumenti conoscitivi per attuare una corretta pianificazione e gestione del territorio, in particolare per la riduzione e la mitigazione del rischio idrogeologico. Per perseguirlo si è verificata l'attendibilità di una serie di elaborazioni statistiche e deterministiche sui dati a disposizione per ottenere Carte di Pericolosità Geologica da instabilità dei versanti.

Si sono applicate alcune tecniche GIS per la valutazione della *pericolosità geologica connessa all'instabilità dei versanti*, scelte fra le diverse alternative proposte in letteratura tecnica, di tipo empirico, statistico, morfometrico, deterministico, probabilistico.

Per la valutazione dell'attendibilità dei metodi proposti i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli dedotti dall'archivio frane dell'inventario IFFI.

Prima di procedere alle analisi si è svolta una fase di preparazione dei layer informativi di input e di georeferenziazione delle informazioni secondo la proiezione UTM, fuso n°32, con il sistema di coordinate ED 1950.

Dapprima si è progettata una metodologia statistica per dedurre informazioni di pericolosità dall'analisi di dati disponibili per l'intera copertura del territorio nazionale, come la base topografica IGM, il DTM 20*20 dell'IGM in scala 1:25.000, la Carta

Geologica d'Italia in scala 1:100.000, la Carta Litologica alla stessa scala, la Carta di Uso del Suolo "Corine Land Cover" in scala 1:100.000, la carta dei Bacini Idrografici IGM in scala 1:25.000, l'inventario dei fenomeni franosi Italiani IFFI in scala 1:25.000, senza richiedere ulteriori indagini ad hoc. Tale metodologia è stata applicata per la realizzazione di una Carta Tematica di "Pericolosità geologica connessa all'instabilità dei versanti", nell'area del "Foglio 250, Castelnuovo di Garfagnana" (scala 1:50.000).

Sono state svolte delle analisi statistiche multivariate (metodo delle UCU, ad uno, a tre e a cinque parametri di input) e delle analisi morfometriche (metodo del TRMI).

Si è analizzata la relazione fra "Uso del Suolo" e "Franosità": la maggior parte dell'area in frana ricade in superfici agricole utilizzate, in particolare in colture permanenti di frutteti e frutti minori.

Si sono costruite le UCU3 dall'incrocio fra Litologia, Pendenza e Uso del Suolo e si è osservato che in corrispondenza di alcune combinazioni si hanno altissime percentuali in frana.

Si è calcolato l'indice morfometrico TRMI (Topographic Relative Moisture Index) (Parker, 1982) mediante il Model Builder di ArcToolbox, e tale indice è stato poi preso in considerazione nella costruzione delle UCU5, per le quali sono stati incrociati gli strati informativi "distanza dalle aste fluviali", "TRMI", "litologia", "pendenza" e "uso del Suolo". Alla mappa ottenuta col metodo delle UCU5 sono state applicate otto funzioni focali di filtro, per attenuare gli eventuali picchi o pixel isolati, ed infine è stato calcolato un indice di efficienza delle classificazione mettendo a confronto le aree classificate a pericolosità alta e molto alta con le aree che risultano effettivamente in frana secondo l'archivio IFFI.

Il FILTRO 2, di forma circolare e raggio pari a 5 celle, nel quale si prende il massimo valore contenuto, ha ottenuto il più alto indice di efficienza ($I_{eff} = 8,20$) e si è messo in evidenza che funzionano meglio i filtri in cui all'interno dell'area focalizzata si prende il valore massimo.

Nella Mappa ottenuta con il metodo delle UCU5 e l'applicazione del Filtro2 si è ottenuto che si individuano il 79,92% dei fenomeni franosi all'interno del 9,74% di area instabile, e questo spiega l'altissima efficienza riscontrata.

Nella stessa area del "Foglio 250, Castelnuovo di Garfagnana" è stata applicata anche una tecnica deterministica, con l'uso di un software, SINMAP, che effettua calcoli di stabilità a

partire da parametri geomorfologici, geotecnici e climatici. Alla mappa dell'indice di stabilità ottenuta è stata applicata una funzione focale di filtro simile a quella del FILTRO2 applicato nelle analisi statistiche per smorzare gli eventuali pixel isolati. Si può osservare che l'81,13% dell'area instabile secondo l'archivio IFFI risulta classificata in Soglia Inferiore e comunque quasi il 90% di essa ha Indice di Stabilità inferiore a 1: un risultato relativamente attendibile. Ma bisogna tener conto del fatto che la qualità dei dati di input che si è scelto di utilizzare non è del tutto adeguata ad analisi deterministiche.

Teoricamente, l'uso di modelli, fisicamente basati semplificati, come SHALSTAB, SINMAP, vincolati da DEM sufficientemente accurati e calibrati da set di dati ricavati da ricerche storiche e monitoraggio, permetterebbe di elaborare mappe della suscettività (propensione) al dissesto superficiale per frana molto più significative e utili dei semplici inventari del dissesto, qui utilizzati per la loro calibrazione. Infatti, se il set dei dati di input è sufficientemente affidabile e dettagliato, i modelli potrebbero individuare aree idonee per il franamento superficiale nel prossimo futuro.

Dalle analisi condotte emerge che, in generale, l'utilizzo di metodologie GIS consente di ottenere, con una certa efficienza e rapidità, tutta una serie di elaborati utili alla definizione della propensione al dissesto di un'area.

La minore attendibilità dei risultati ottenuti nell'applicazione deterministica del presente lavoro è comunque compensata dal fatto che i dati di input utilizzati sono disponibili per l'intera copertura nazionale a costo zero, per cui le uniche spese sono legate alla costruzione dei modelli di geoprocessing dei dati e alla loro applicazione da parte di esperti GIS.

***GEOLOGICAL HAZARD MAPS ELABORATION BY STATISTICAL
AND DETERMINISTIC METHODS AND COMPARATIVE ANALYSIS
OF THE OBTAINED RESULTS.***

Natural phenomena hazard and risk assessment is a topic of major interest for both geoscientist and engineering professionals.

Italy is characterized by a widespread landslide risk. A landslide is the result of a great variety of processes which include geological, geomorphological meteorological, climatic or human factors. The most important terrain factors are: lithology, structure, drainage density, slope, landuse, geomorphology, road network, and many others, so it would be useful to learn those informations (both by traditional methods and by the most modern technologies) and to be aware of the influence of each one.

This work's aim is to make available some cognitive tools to enact an accurate country planning and management, in particular to decrease and mitigate hydrogeological hazard. To achieve this aim, the reliability of a set of statistical and deterministic approaches on the available data will be tested, to obtain "*landslide hazard geological maps*".

Some GIS technologies for *landslide hazard evaluation*, selected among the various choice found in technical literature (empirical, statistical, morphometrical, deterministic or probabilistic), have been applied.

To evaluate the proposed methods reliability, the obtained results have been compared with those derived from IFFI landslide inventory archive.

Before going on with the analyses a phase of organization of the input layers and georephorientation of the informations according to ED1950, UTM, Zone_32N projection have been carried on.

At First a statistical method to obtain informations about *landslide hazard* from datasets available on all Italian area, such as the IGM topographic base, IGM DTM 20*20 in 1:25.000 scale, the Italian Geological Cartography in 1:100.000 scale, Lithological Cartography in 1:100.000 scale, "Corine Land Cover" Land Use Cartography in 1:100.000 scale, IGM Idrographical Basins Cartography in 1:25.000 scale, (Italian landslides Inventory) IFFI in 1:25.000 scale, without any other investigation, has been designed.

This statistical method has been applied to obtain a landslide hazard thematic map, in the area of "Foglio 250, Castelnuovo di Garfagnana" (in 1:50.000 scale).

Multivariate statistical analyses (by UCU method, with one, three or five input layers) and morphometrical analyses (with TRMI method) have been carried on.

The relationship between “landuse” and “landslide occurrence” has been analysed: most of the areas involved in landslides are permanently cultivated and managed areas, in particular, fruit gardens.

UCU3 has been built overlaying “lithology”, “Slope” and “Landuse” input layers: some of those UCU are all involved in landslides.

The morphometrical Topographic Relative Moisture Index (TRMI) (Parker, 1982) has been evaluated by ArcToolbox Model Builder. Then “distance from rivers”, “TRMI”, “lithology”, “Slope” and “Landuse” input layers, has been overlayed to build up UCU5.

Eight focal functions have been applied to the UCU5 obtained map to attenuate peaks or isolated pixel. Finally a Classification Efficiency Index has been calculated comparing the most hazardous classified areas with those effectively involved in landslides according to IFFI inventory.

FILTER 2 (circular shape; radius = 5 pixels; the maximum value contained will be taken) obtained the higher Classification Efficiency Index ($I_{eff} = 8,20$). We can point out that the best filters are those in which the maximum value in the focalised area is taken.

In the map obtained by UCU5 method after applying FILTER 2, 79,92% of the landslide phenomena are comprised in the 9,74% of the unstable area: this explain the so high efficiency noticed.

On the same area of “Foglio 250, Castelnuovo di Garfagnana” a deterministic method has been applied, with the help of SINMAP, a software designed to evaluate slope stability with geomorphologic, geotechnical and climatic parameters in input.

A filter similar to FILTER 2 has been applied to the map of Stability Index obtained by SINMAP to attenuate peaks or isolated pixel.

It can be noted that 81,13% of the IFFI inventory unstable area is classified in lower bound and anyway about 90% of it has a Stability Index lower than 1: a relatively reliable result. But it must be taken into account that input data chosen quality is not suitable for deterministic analyses.

From the analyses that have been carried on, it can be pointed out that in general the use of GIS methodologies allows to efficiently and quickly obtain a set of results useful to define a certain area landslide susceptibility.

In theory, using simplified physically based models, such as SHALLSTAB, SINMAP, linked to accurate DEM and calibrated by a set of data derived from historical archives or monitoring, would allow to work out more significant and useful “shallow landslide susceptibility maps” than landslides inventories that in this work have been used to calibrate the models. In fact, if the input dataset is enough reliable and detailed, those models could detect areas that could be involved in future landslides.

The lower reliability of the designed method with respect to other more rigorous methods is balanced by the widespread, no charge, availability, of the chosen kind of input data, so that only the geoprocessing models building and their applications by GIS expert consultants would be on charge.

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
2	METODOLOGIA.....	3
3	PERICOLOSITÀ DA FRANA NELLA NORMATIVA ITALIANA	5
4	REDAZIONE DI CARTE DI PERICOLOSITÀ DA FRANA.....	11
4.1	L'UNITÀ TERRITORIALE DI BASE	11
4.2	CARATTERISTICHE DELLE CARTE DI PERICOLOSITÀ DA FRANA.....	13
4.3	METODOLOGIE GIS PER LA REDAZIONE DI CARTE DI PERICOLOSITÀ DA FRANA	15
4.4	METODI DI ZONAZIONE SPAZIALE	16
4.4.1	METODI QUALITATIVI (<i>DIRETTI</i> O EURISTICI)	16
4.4.2	METODI QUANTITATIVI (<i>INDIRETTI</i>)	19
4.4.2.1	METODI STATISTICI	19
4.4.2.1.1	ANALISI DISCRIMINANTE.....	21
4.4.2.2	ANALISI MORFOMETRICA	23
4.4.2.2.1	RICERCA DI SOGLIE CLIVOMETRICHE.....	25
4.4.2.2.2	RELAZIONE PENDENZA -PRECIPITAZIONE	26
4.4.2.2.3	RELAZIONE PENDENZA -TRMI	26
4.4.2.3	METODI GEOTECNICI.....	28
4.4.2.3.1	METODI GEOTECNICI DETERMINISTICI.....	28
4.4.2.4	METODI DETERMINISTICI DISTRIBUITI	36
5	LA SCELTA DEI DATI DI INPUT.....	37
5.1	QUALITÀ DEI DATI E DIMENSIONI DEI FILES DI INPUT.....	37
5.2	L'IMMAGAZZINAMENTO DEI DATI TOPOGRAFICI	38
5.3	LE BANCHE DATI DISPONIBILI.....	39
5.3.1	IL PROGRAMMA CORINE ED IL PROGETTO CLC.	39
5.3.2	IL PROGETTO IFFI	40
5.3.3	LA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA IN SCALA 1:100.000.....	42
5.4	I DATI UTILIZZATI	43
5.5	LA SCALA DI LAVORO.....	44

6	L'AREA DI STUDIO	45
6.1	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	45
6.2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO	47
6.2.1	DESCRIZIONE GENERALE	47
6.2.2	SISMICITÀ DELL'AREA	48
6.2.3	FRANOSITÀ DELL'AREA	51
6.3	STUDI ESISTENTI SULL'INSTABILITÀ DEI VERSANTI	53
6.4	LA PREPARAZIONE DEI DATI DI INPUT	56
6.5	DENSITÀ DI DRENAGGIO	72
6.6	LA GEOREFERENZIAZIONE	74
7	ELABORAZIONI STATISTICHE	75
7.1	RELAZIONE FRA USO DEL SUOLO E FRANOSITÀ	75
7.2	RELAZIONE FRA LITOLOGIA-PENDENZA USO DEL SUOLO E FRANOSITÀ	79
7.2.1	CREAZIONE DELLA UCU3 e RELAZIONE FRA UCU3 E FRANOSITÀ	79
7.3	CALCOLO DEL TRMI (Topographic Relative Moisture Index)	86
7.4	RELAZIONE FRA DISTANZA DALLE ASTE FLUVIALI, TRMI, LITOLOGIA, PENDENZA, USO DEL SUOLO E FRANOSITÀ	89
7.4.1	LA CREAZIONE DELLA UCU5 E LA RELAZIONE FRA UCU5 E FRANOSITÀ	89
7.4.2	APPLICAZIONE DI FUNZIONI FILTRO	93
7.4.3	INDICE DI EFFICIENZA	100
8	ELABORAZIONI DETERMINISTICHE	105
8.1	IL SOFTWARE SINMAP	105
8.2	I PARAMETRI DI INPUT	106
8.3	LE ELABORAZIONI E I RISULTATI	114
8.3.1	INDICE DI EFFICIENZA	123
9	CONCLUSIONI	127

1 INTRODUZIONE

La valutazione della pericolosità e del rischio connesso a fenomeni naturali è un obbiettivo molto importante, sia dal punto di vista scientifico che dal punto di vista tecnico.

L'Italia è una nazione molto esposta al rischio di instabilità dei versanti. Una frana è il risultato di una grande varietà di processi e numerosi sono i fattori che, interagendo, possono influire sulla instabilità dei versanti.

Per potere intervenire in maniera efficace, progettare azioni di mitigazione della pericolosità connessa a fenomeni di instabilità dei versanti e predisporre interventi in sede di pianificazione territoriale è necessaria una profonda conoscenza del territorio e delle sue caratteristiche, individuando le aree maggiormente esposte ai fenomeni franosi e prevedendo l'attivazione dei dissesti. Dunque è necessario ricavare le informazioni di interesse (sia con metodi tradizionali, sia avvalendosi delle più moderne tecnologie) e conoscere l'influenza che ciascun fattore può avere.

A livello internazionale esistono molte definizioni di pericolosità, spesso non in accordo fra di loro, per cui è importante scegliere una definizione ben precisa e poi operare sulla base di questa. In questa sede adottiamo come definizione quella scelta dal Gruppo nazionale per la Difesa dalle catastrofi idrogeologiche (GNDCI): la *Pericolosità* esprime la probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di determinata intensità si verifichi in un dato periodo di tempo e in una data area (Varnes & IAEG, 1984; Turner e Shuster, 1996; Canuti e Casagli, 1996; Amanti et al., 1996).

Nello studio della pericolosità bisognerebbe prendere considerazione tutti i fattori che si presume siano strettamente correlati con la probabilità che si verifichi instabilità dei versanti, ma essi potrebbero essere molto numerosi. Pertanto è necessario scegliere i più significativi in funzione del tipo di studio in atto, della scala di lavoro e delle dimensioni dell'area oggetto dello studio stesso. I fattori coinvolti nella possibilità che si verifichino dissesti possono essere di natura geologica, morfologica e idrologica: l'acclività e l'esposizione dei versanti, le caratteristiche geomorfologiche e litotecniche, i lineamenti tettonici, il reticolo idrografico, l'uso del suolo, la presenza di strade, ferrovie ed altre opere antropiche.

Con il presente lavoro si vuole giungere alla valutazione della *pericolosità geologica connessa all'instabilità dei versanti* nel Foglio 250 Castelnuovo di Garfagnana e la

zonazione del territorio attraverso la classificazione di aree con diverso grado di propensione al dissesto.

Dopo aver preparato una serie di strati informativi relativi ai vari fattori considerati, e i database correlati, si svolgeranno una serie di elaborazioni ed analisi spaziali dei dati in ambiente GIS.

In letteratura sono disponibili diverse tecniche per la realizzazione di mappe di pericolosità, di tipo empirico, statistico, morfometrico, deterministico, probabilistico, che possono essere applicate con l'ausilio di tecnologie GIS.

In questo lavoro si progetterà una metodologia statistica, basata sul metodo delle “Unità a Condizioni Uniche”, per dedurre informazioni di pericolosità dall'analisi di dati disponibili per l'intera copertura del territorio nazionale, come la base topografica IGM, il DTM 20*20 dell'IGM in scala 1:25.000, la Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000, la Carta Litologica alla stessa scala, la Carta di Uso del Suolo “Corine Land Cover” in scala 1:100.000, la carta dei Bacini Idrografici IGM in scala 1:25.000, l'inventario dei fenomeni franosi Italiani IFFI in scala 1:25.000, senza richiedere ulteriori indagini ad hoc. La metodologia statistica verrà applicata per la realizzazione di una Carta Tematica di “Pericolosità geologica connessa all'instabilità dei versanti”, nell'area del Foglio 250, Castelnuovo di Garfagnana (scala 1:50.000).

Nella stessa area verrà applicata anche una tecnica deterministica, con l'uso di un software, SINMAP, che effettua calcoli di stabilità a partire da parametri geomorfologici, geotecnici e climatici.

Per la valutazione dell'attendibilità dei metodi proposti si confronteranno i risultati ottenuti con quelli dedotti dall'archivio frane dell'inventario IFFI.

L'eventuale minore attendibilità della metodologia che ci si propone di redigere in questo lavoro rispetto ad altre metodologie più precise è compensata dal fatto che i dati di cui ci serviremo sono disponibili a costo zero, per cui le uniche spese sarebbero legate alla costruzione dei modelli di geoprocessing dei dati e alla loro applicazione da parte di esperti GIS.

Da questo lavoro verranno fuori una serie di interessanti spunti di ricerca che verranno discussi nelle pagine che seguono.

2 METODOLOGIA

L'obiettivo di questo lavoro è rendere disponibili alcuni strumenti conoscitivi per attuare una corretta pianificazione e gestione del territorio, in particolare per la riduzione e la mitigazione del rischio idrogeologico. Per perseguirlo si intende verificare l'attendibilità di una serie di elaborazioni statistiche e deterministiche sui dati a disposizione per ottenere "Carte di Pericolosità Geologica da Instabilità dei Versanti".

I fenomeni che vengono trattati in questo lavoro hanno una forte connotazione spaziale. Si sceglie di utilizzare tecniche GIS (Geographical Information System), che forniscono *"un potente set di strumenti atto a raccogliere, immagazzinare, recuperare, trasformare e visualizzare dati spaziali del mondo reale"* (Burrough, 1986), in modo da poter gestire contemporaneamente le componenti informative alfanumeriche e geografiche.

Le metodologie GIS consentono di elaborare delle analisi sia statistiche che deterministiche, per le quali si dà una stima probabilistica dei parametri di input.

Si sceglie di utilizzare dati ampiamente disponibili sull'intero territorio nazionale, praticamente a costo zero, prelevandoli dalle "banche dati" costruite all'interno di vari progetti che hanno goduto di finanziamenti pubblici, alcuni dei quali sono ancora in corso di svolgimento.

La scala di lavoro adottata, 1:50.000, viene scelta sulla base del set di dati di input che si è deciso di utilizzare e del tipo di prodotto da realizzare.

I dati che verranno utilizzati sono disponibili in varie scale: è necessario adottare una scala di lavoro che corrisponda ad una copertura minima diffusa a livello nazionale e pertanto disponibile ovunque, in modo da poterla agevolmente utilizzare per altre applicazioni in altre aree del territorio italiano.

Le metodologie disponibili, sia statistiche che deterministiche, non permettono un dettaglio spaziale molto spinto essendo vincolate alla disponibilità dei dati sul territorio. Qualora infatti si disponesse di dati di dettaglio anziché un approccio statistico o deterministico approssimato sarebbe più preciso effettuare una analisi geotecnica tradizionale.

Le scale di lavoro più comunemente adottate per una carta di pericolosità per fenomeni franosi sono pertanto comprese tra 1:10.000 e 1:100000. Anche se molti degli strati

informativi utilizzati hanno un dettaglio superiore, si sceglie di lavorare in scala 1:50.000, per due motivi:

- la 1:50.000 una scala intermedia fra la 1:10.000 e la 1:100.000;
- il Progetto CARG, che prevede la realizzazione della cartografia geologica e geotematica (che rientra fra i compiti istituzionali dell'APAT in quanto erede dell'ex Servizio Geologico Nazionale, ex lege 68/60) è realizzato su scala nazionale alla scala 1:50.000. Al progetto CARG è associata una banca dati ad elevato contenuto informativo dalla quale poter ricavare, all'occorrenza, anche carte geologiche e geotematiche di maggiore dettaglio che, contenendo numerose e preziose informazioni, possono essere utilizzate per scopi applicativi anche prima della stampa dei fogli alla scala 1:50.000.

Vengono poi redatte delle carte tematiche utili per definire la pericolosità connessa all'instabilità dei versanti nell'area coperta dal Foglio n° 250 "Castelnuovo di Garfagnana", in scala 1:50.000.

Gli strati informativi di partenza, in formato vettoriale o raster, vengono analizzati sfruttando principalmente nello *studio statistico* il modulo Spatial Analyst di Arc Toolbox, appartenente alla suite ArcGIS 9.1, mentre nello *studio deterministico* si applica il modulo SINMAP2 di ArcGIS 9.x.

Confrontando i risultati ottenuti con quelli provenienti da set di dati più completi e di maggior dettaglio si può valutare l'attendibilità delle scelte adottate.

3 PERICOLOSITÀ DA FRANA NELLA NORMATIVA ITALIANA

La Legislazione Italiana in materia di rischio idrogeologico è molto ampia e complessa, specialmente per quel che riguarda gli ultimi vent'anni, durante i quali si è cercato di colmare un vuoto legislativo che durava dall'inizio del 1900.

Le leggi principali che regolamentavano la difesa del suolo lungo i corsi d'acqua (**R.D. 523/1904**) e nelle zone montane (**L. 445/1908**) sono state emanate all'inizio del secolo scorso, ed era ed è ancor oggi vigente, nelle zone montane, la normativa riferita al Vincolo idrogeologico, ai sensi del **R.D. 3267 del 1923**, la cui competenza è oggi trasferita alle Regioni, e che anche se oggi obsoleta e non sempre efficace nei suoi effetti di prevenzione, all'epoca ha svolto una funzione importante di controllo delle modificazioni e trasformazioni d'uso del territorio montano.

Molte delle leggi nazionali riguardanti la gestione e la mitigazione del rischio idrogeologico sono state emanate in conseguenza di eventi calamitosi gravi e quasi sempre con lo specifico obbiettivo di risanare i guasti prodotti e per stanziare finanziamenti necessari a ripristinare le condizioni minime di vivibilità dei luoghi danneggiati.

Con la **Legge n°185/1952** venne affrontata la più gravosa piena del fiume Po che colpì il Polesine e diverse aree del nord Italia nel 1951.

L'evento calamitoso lungo il fiume Arno che ebbe eco in tutta l'Europa e che colpì la città di Firenze nel 1966 e le altre grandi calamità degli anni sessanta hanno portato il Ministero dei Lavori Pubblici ad affidare ad una apposita Commissione, presieduta dall'Ing. G. De Marchi (la cosiddetta Commissione De Marchi¹), il compito di procedere alla verifica del "Piano Operativo per la sistematica regolazione dei corsi d'acqua naturali" redatto dal Ministero stesso e allo studio di una programmazione delle opere da attuarsi esaminando i problemi tecnici, economici, legislativi e amministrativi per attuare gli interventi necessari per la generale sistemazione idraulica e di difesa del suolo sulla base di una completa programmazione.

¹ Commissione Interministeriale per lo Studio Della Sistemazione Idraulica e della Difesa del Suolo (1967-1970)

La Commissione introduce il concetto di PIANO DI BACINO, inteso come programmazione delle opere idrauliche ed idraulico-forestali per giungere alla sistemazione del bacino ed avvia il processo di costituzione del sistema delle Autorità di Bacino, che ha il suo culmine dopo molti decenni, dopo un lungo e sofferto iter parlamentare, nella **Legge 183 del 18/05/1989**, “Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della Difesa del Suolo”.

Essa asserisce che la difesa del suolo comprende l’attività conoscitiva, di pianificazione e di gestione del territorio finalizzate alla difesa dalle acque ed alla tutela dei relativi aspetti ambientali ed identifica nel bacino idrografico l’ambito territoriale di riferimento della difesa del suolo, suddividendo il territorio italiano in bacini idrografici nazionali, interregionali e regionali.

La legge introduce la pianificazione della difesa del suolo a scala di bacino idrografico con valore di Piano territoriale di settore, sovraordinato agli altri strumenti di pianificazione territoriale a scala locale (regionale, provinciale e comunale). Il Piano di Bacino o i Piani stralcio ad esso collegati hanno quindi la possibilità di introdurre una serie di misure, indirizzi e norme per orientare e vincolare l’utilizzo del suolo nelle aree considerate a rischio idrogeologico o idraulico per diverse tipologie di fenomeni di dissesto.

La legge istituisce le Autorità di Bacino, una sorta di ente misto paritetico tra Stato e Regioni, che hanno il compito di redigere ed approvare il piano di bacino.

Tra le leggi nazionali più importanti, va inoltre segnalata la *legge n°102/90* inerente la ricostruzione e lo sviluppo delle zone colpite dall’alluvione della Valtellina del 1987. In questa legge, emanata per affrontare un evento calamitoso straordinario, sono contenuti, per la prima volta, alcuni aspetti significativi relativamente alle tematiche del rischio e della pericolosità idrogeologica, nonché vengono introdotti nuovi strumenti di prevenzione. La legge, in analogia con i principi della appena varata L. 183/89, disponeva la realizzazione di una serie di Piani di sottobacino idrografico all’interno dei quali programmare gli interventi di mitigazione del rischio idrogeologico non solo tramite opere di difesa strutturali ma anche tramite opere non strutturali quali l’analisi e la verifica di compatibilità della pianificazione urbanistica a scala comunale con lo stato di dissesto del territorio.

Sempre al principio degli anni ‘90, viene emanata la **legge n°225/92** in materia di Protezione Civile. Anche in questo caso si tratta di una legge quadro che abbraccia una

serie di problematiche molto vaste riguardanti la previsione, la prevenzione, l'emergenza ed il superamento dell'emergenza. La legge prevede, tra l'altro, la realizzazione dei Programmi di previsione e prevenzione dei rischi naturali e tecnologici da parte delle Regioni e delle Province e introduce inoltre il Piano Comunale di Protezione Civile come strumento essenziale di prevenzione dei rischi a scala locale. La legge è per molti versi ancora da attuare, soprattutto per quanto concerne la realizzazione dei Piani di Protezione Civile comunali, e soffre inoltre di ritardi dovuti ad una certa sovrapposizione e confusione di tematiche e competenze proprio con la legge 183/89, soprattutto nel merito dei rapporti tra Programmi di previsione prevenzione e Pianificazione di bacino.

Ma per quanto riguarda il dissesto collinare e montano si deve attendere l'emanazione del **D.L. 180 del 11/06/1998²**, che prevede l'individuazione e la perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico, stabilendo altresì una serie di criteri generali, che sono stati precisati nell'“Atto di indirizzo e Coordinamento” contenuto nel **D.P.C.M. 29/09/1998** ed ancora ridefiniti dalla **Legge n. 226 del 13/07/1999**.

Uno dei principali obiettivi del decreto è la perimetrazione, all'interno del territorio nazionale, delle aree soggette a rischio idrogeologico, individuando situazioni di pericolosità dipendenti dalle condizioni idrogeologiche del territorio, a prescindere dal fatto che l'area fosse stata o meno interessata da eventi documentati nel passato. Ciò che impose di riferirsi agli eventi del passato furono i limiti di tempo imposti per la perimetrazione.

Il rischio può essere calcolato come il prodotto della pericolosità e della vulnerabilità degli elementi a rischio. Il significato di questi termini verrà chiarito nelle pagine successive.

L'Atto di Indirizzo e Coordinamento considera “elementi a rischio” in primo luogo l'incolumità delle persone, poi gli agglomerati urbani, le aree di espansione urbanistica, le aree di insediamenti produttivi o di impianti tecnologici di rilievo, le infrastrutture a rete, le vie di comunicazione strategiche, il patrimonio ambientale, i beni di interesse rilevante, le aree sede di servizi pubblici e privati, gli impianti sportivi e ricreativi, le strutture ricettive ed infrastrutture primarie.

Le attività erano articolate in tre fasi:

- Individuazione delle aree soggette a rischio idrogeologico;

² convertito in Legge n. 267 del 03/08/1988 e meglio puntualizzato dalla Legge n. 266 del 13/07/1999

- Perimetrazione, valutazione dei livelli di rischio e definizione delle misure di salvaguardia;
- Programmazione della mitigazione del rischio.

Le aree individuate e perimetrate ai sensi dell'art. 1 comma 1 del D.L. 180/1998 sono sottoposte con provvedimento delle Regioni o delle Autorità di Bacino, a vincolo temporaneo costituente misure di salvaguardia, ai sensi dell'art. 17, comma 6-bis, della L. 183/1989.

Le indicazioni della L. 183/1989 vengono integrate nella **Legge 226 del 13/07/1999**³, che contiene modifiche sostanziali del d.l. 180/1998, in quanto il comma 1 dice che “Entro il termine perentorio del 30 giugno 2001 le Autorità di bacino di rilievo nazionale, interregionale e le Regioni per i restanti bacini, adottano, ove non si sia già provveduto, Piani stralci di bacino per l'assetto idrogeologico redatti ai sensi del comma 6-ter dell'art. 17 della legge 183/89 e successive modificazioni, che contengano in particolare l'individuazione delle aree a rischio idrogeologico e la perimetrazione delle aree da sottoporre a misure di salvaguardia, nonché le misure medesime”.

Questa incombenza rientrava già tra le priorità per la costruzione dei Piani di Bacino, ma è qualitativamente diverso il ruolo che la Legge 226/1999 affida alle individuazioni e perimetrazioni delle aree a rischio idraulico ed idrogeologico introdotte dal d.l. 180/1998, in quanto i Piani straordinari, che contengono in particolare “l'individuazione e la perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico molto elevato per l'incolumità delle persone e per la sicurezza delle infrastrutture e del patrimonio ambientale e culturale” hanno lo scopo di rimuovere le situazioni a rischio più alto.

Inoltre i Piani assumono la rilevanza di un vero e proprio elemento di pianificazione, con tutte le implicazioni di complessità e di interrelazione tipiche di questi strumenti, con la possibilità di un continuo e costante processo di integrazione e verifica (Ferrucci, 2005).

La **Legge n. 483 del 04/12/1993**, nell'art. 12, integra l'art. 17 della L. 183/1989, in quanto prevede la redazione di eventuali piani interrelati ai Piani di Bacino, che rimangono strumento sovraordinato relativamente alla pianificazione e programmazione dell'uso del territorio interessato.

³ Legge n. 226 13/07/1999: “Conversione in Legge con modificazioni del d.l. 13 maggio 1999, n. 132, recante norme urgenti in materia di Protezione Civile” (convertito con modificazioni nella Legge n. 267 del 1998).

Più recentemente, a seguito dei fenomeni franosi che hanno colpito l'abitato di Sarno in Campania, il Governo italiano ha emanato la **legge n°267/98**, partendo *dal* D.P.C.M. 29/09/1998 *“Atto di indirizzo e coordinamento per l'individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all'art. 1, commi 1 e 2, del D.L. 11 giugno 1998, n. 180”*, che a seguito degli eventi calamitosi della Regione Campania, ridefinisce i contenuti del d.m. 14/02/1997, demandando alle Autorità di bacino l'adozione dei Piani Stralcio per il Rischio idrogeologico (idraulico e di stabilità dei versanti).

La legge n°267/98, proposta dal Ministero dell'Ambiente, dispone tra l'altro che le Autorità di bacino Nazionali, Interregionali e le Regioni adottino Piani stralcio straordinari che contengano in particolare l'individuazione e la perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico molto elevato. Questi Piani straordinari sono diretti a rimuovere le situazioni a rischio molto elevato nelle quali sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture, con conseguente inagibilità delle stesse. Per tutte le aree identificate e perimetrate dovranno essere apposte misure temporanee di salvaguardia e realizzati progetti di intervento per la mitigazione del rischio.

Per il bacino del Po, l'Autorità di Bacino ha incaricato le Regioni di individuare e perimetrare le aree a rischio molto elevato, mettendo a disposizione i relativi finanziamenti.

Sempre a seguito di un evento disastroso avvenuto a Soverato in Calabria è stata emanata la **legge n° 365/2000** che, oltre ad anticipare ed accelerare le procedure per l'adozione dei Piani di Assetto idrogeologico previsti dalle precedenti normative, pone una serie di vincoli nell'uso del territorio per le aree a rischio idrogeologico non ancora oggetto di pianificazioni specifiche o di idonee misure di salvaguardia. Inoltre, la legge dispone l'avvio di una serie di accertamenti straordinari di polizia idraulica per individuare le situazioni maggiormente a rischio lungo la rete idrografica.

Per riordinare gli aspetti della normativa italiana riguardanti la difesa dell'ambiente è stato recentissimamente pubblicato un Testo Unico dal titolo *“Codice Ambientale”*. Si tratta del **Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152** (Supplemento ordinario n. 96 alla Gazzetta ufficiale 14 aprile 2006 n. 88) *“Norme in materia ambientale”* di attuazione della Delega conferita al Governo per il "riordino, il coordinamento e l'integrazione della legislazione in materia ambientale" con L.308/04, entrato in vigore il 29 aprile 2006. Obiettivo del provvedimento è semplificare, razionalizzare, coordinare e rendere più chiara la

legislazione ambientale nei seguenti settori: procedure per la valutazione ambientale strategica (VAS), per la valutazione d'impatto ambientale (VIA) e per l'autorizzazione ambientale integrata (IPPC); difesa del suolo, lotta alla desertificazione, tutela e gestione delle acque; gestione dei rifiuti e bonifiche; tutela dell'aria e riduzione dell'inquinamento; danno ambientale.

Si segnala infine il **Decreto Ministeriale del 11/03/1988**, “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”, e la relativa circolare applicativa, che pur non contenendo strumenti di pianificazione e programmazione della difesa del suolo, definiscono per una serie di opere di intervento sul territorio, le indagini necessarie per la progettazione a vari livelli, la realizzazione ed il collaudo dell'intervento stesso ed inoltre pongono una serie di criteri tecnici cui devono rispondere i calcoli geotecnici effettuati.

4 REDAZIONE DI CARTE DI PERICOLOSITÀ DA FRANA

4.1 L'UNITÀ TERRITORIALE DI BASE

Le recenti tecniche GIS utilizzate per la valutazione della pericolosità da frana prevedono l'individuazione delle cosiddette “unità territoriali di base” (UTB), che devono essere concepita come un dominio territoriale spazialmente omogeneo, cartografabile con criteri sufficientemente oggettivi e differenziabile dalle unità adiacenti, da cui deve risultare separabile attraverso limiti netti (Hansen, 1984), e devono essere scelte in funzione della natura e dell'estensione del tipo di studio. In letteratura tecnica vengono riportati quattro tipi fondamentali di UTB:

- *Celle Elementari* (pixel o picture element) - la più piccola unità di mappatura raster
- *Unità Geomorfologiche*, dette anche “*unità pendio*”.
- *Emibacini* (Sottobacini e Versanti Principali).
- *Unique Condition Units* (Unità a Condizioni Uniche), che derivano dalla sovrapposizione e dalla combinazione di diversi tematismi opportunamente scelti.

La scelta del tipo di unità condiziona in maniera evidente il tipo di analisi e la scelta del modello di simulazione.

La suddivisione in *celle elementari* nasce da criteri geometrici: l'area di studio viene suddivisa mediante una griglia di celle quadrate regolari di ampiezza predefinita e costante, in genere coincidente con la dimensione del pixel, che sta alla base della struttura raster utilizzata nella rappresentazione dei dati spaziali e dei relativi attributi. Questo tipo di unità base viene scelta perché è più facile ottenere e manipolare oggetti di tipo raster. Inoltre la rappresentazione in formato griglia semplifica e velocizza i calcoli al computer, grazie alla distribuzione regolare dei dati nello spazio. Però le celle regolari non hanno alcun legame con i reali lineamenti geologici e geomorfologici del territorio, né con le condizioni a contorno, né con i meccanismi di frana. Questo è tanto più evidente quanto più ampia è la dimensione della cella. Pertanto, a volte, i risultati ottenuti sono fisicamente inaccettabili.

Le nuove tecnologie consentono di acquisire (tramite scanner) ed immagazzinare quantità di dati sempre più consistenti, per cui oggi è possibile utilizzare celle di dimensioni sempre

più ridotte (aumento della risoluzione spaziale), ma questo accresce anche i tempi di elaborazione e richiede enormi spazi di archiviazione.

L'*unità geomorfologica o unità pendio* nasce dall'ipotesi che le relazioni fra materiali naturali, agenti modellatori e processi derivati si risolvono in differenti forme del paesaggio, quindi si individua grazie a evidenze topografiche (pendenza, esposizione, lineamenti geologici e corsi d'acqua) e condizioni geologiche. La dimensione dell'unità "pendio" dipende dalla dimensione media dei corpi di frana, e dalla tipologia di frana che si sta studiando. Purtroppo però la scelta delle varie unità pendio è soggettiva ed è legata all'abilità ed alle conoscenze del geomorfologo sull'area in esame.

Gli *emibacini* sono suddivisioni territoriali geomorfologicamente significative che delineano unità territoriali all'interno delle quali si analizzano le relazioni fra fenomeni franosi e parametri geoambientali in essi rilevati. È praticamente impensabile che si possano tracciare gli eventuali contorni dei pendii su mappe che coprono aree vaste; Carrara (1988, 1992) e Carrara et al. (1995) hanno sviluppato degli algoritmi per la derivazione automatica al computer, da un accurato DTM, delle linee di dislivello e di quelle di impluvio.

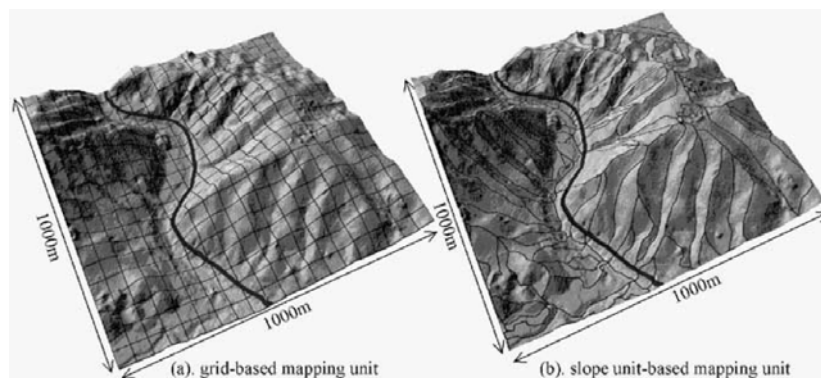


Figura 4.1: Differenza fra l'unità di mappatura basata su griglia e l'unità di mappatura basata sull'unità pendio. Nel caso (a) ciascuna unità non ha alcuna relazione con le caratteristiche topografiche, mentre nel caso (b) ciascuna unità pendio corrisponde alla parte destra o alla parte sinistra di ciascun pendio (da Xie et al., 2003a).

Le *Unique Condition Units*, basate sul concetto di Unità Territoriale Omogenea, derivano da operazioni di sovrapposizione ed intersezione di carte tematiche che descrivono le poche classi sufficienti ad esprimere la variabilità di ciascun fattore di instabilità.

E' possibile correlare tali combinazioni con l'evidenza di dissesti osservati nelle aree in studio e ricavare, secondo differenti metodologie, una indicazione sulla propensione al dissesto.

Con le moderne tecniche informatiche, l'individuazione delle UCU è quasi esclusivamente automatizzata, ma i criteri di classificazione utilizzati nelle mappe tematiche di partenza e l'ordine di sovrapposizione hanno influenza sul risultato finale. Inoltre, a causa di una non perfetta coincidenza fra i poligoni dei tematismi impiegati, possono formarsi poligoni anche piccolissimi, non aventi alcun riscontro reale sul terreno. In questo caso si richiede una correzione topologica da parte dell'utente.

4.2 CARATTERISTICHE DELLE CARTE DI PERICOLOSITÀ DA FRANA

Una carta di pericolosità da frana deve teoricamente fornire le seguenti informazioni:

- distribuzione attuale delle frane nel territorio di interesse
- tipo di frana ed eventuale evoluzione tipologica del movimento;
- intensità del fenomeno;
- possibile evoluzione *spaziale* in termini di volume di materiale coinvolto, velocità, di *distanza di propagazione* e di *limiti di espansione laterale e di regressione a monte* (per cui si giunge ad una zonazione spaziale);
- evoluzione *temporale* della probabilità di frana (quando il fenomeno può verificarsi nel *tempo*).

La *previsione sulla tipologia di movimento* è necessaria in quanto il tipo di fenomeno influenza la valutazione previsionale sia dell'intensità che della vulnerabilità. Inoltre i fattori di controllo per l'innescio e la propagazione sono legati alla tipologia di fenomeno, per cui i modelli utilizzati per la previsione spaziale e temporale del fenomeno verranno scelti in funzione di questo. I criteri utilizzati per la previsione tipologica si utilizzano sono intuitivi non formalizzati e, ovviamente, presentano dei margini di incertezza, ma offrono dei buoni criteri di stima. Ad esempio, a meno che non ci siano state consistenti modifiche morfoclimatiche dell'area, una frana già avvenuta tende a verificarsi con analoga cinematica. In funzione dell'assetto idrogeologico e geomorfologico si può intuire il tipo di movimento da aspettarsi: difficilmente si verificherà una frana da crollo su pendii argillosi

di pendenza moderata. Inoltre, in aree con caratteristiche analoghe si possono verificare movimenti analoghi.

La *previsione dell'evoluzione spaziale dei fenomeni franosi* è molto importante nella valutazione di una pericolosità distribuita sul territorio. L'evoluzione spaziale di un fenomeno è legata alla sua natura fisico-meccanica, pertanto è regolata da leggi molto complesse, che devono tener conto dei parametri fisici (massa, densità, etc.), meccanici (coesione, resistenza al taglio, etc.) e geometrici (forma dei blocchi o dei ciottoli) dei materiali coinvolti e dei diversi fattori esterni che possono influire sulla propagazione del fenomeno, quali la topografia, la rugosità della superficie, la vegetazione, la presenza di strutture antropiche, etc.

Nella previsione dell'evoluzione di un fenomeno franoso bisogna tener conto della distanza di propagazione, dei limiti di retrogressione e dell'espansione laterale.

Le leggi che si utilizzano nelle simulazioni numeriche possono essere molto diverse, a seconda del tipo di fenomeno, e vanno approfondite di volta in volta.

La *zonazione spaziale* (dall'inglese “zonation”) della pericolosità da frana di cui si parla in letteratura consiste nella rappresentazione grafica della pericolosità da frana mediante “carte di stabilità dei versanti”, che possono essere realizzate con metodi diretti o indiretti.

Rispetto alla definizione o meno del fattore temporale, Hartlen e Viberg (1988) distinguono una *pericolosità relativa* (o suscettibilità), che è il grado di pericolosità di un'area rispetto a quello delle altre ed una *pericolosità assoluta*, ovvero, nel caso della pericolosità di frana, il calcolo del fattore di sicurezza (approccio deterministico) oppure della probabilità di rottura (approccio probabilistico) di un certo versante in un certo tempo. Poiché risulta molto difficile definire il fattore tempo, per la scarsità di dati relativi alla ricorrenza degli eventi, quelle che comunemente vengono definite “carte di pericolosità” sono in realtà delle “carte di suscettibilità”, in quanto indicano semplicemente la localizzazione geografica delle aree a diverso grado di pericolosità (Brabb, 1984).

4.3 METODOLOGIE GIS PER LA REDAZIONE DI CARTE DI PERICOLOSITÀ DA FRANA

In letteratura esistono svariati approcci per lo studio della stabilità dei pendii e per la valutazione della pericolosità da frana, ciascuno utile per particolari applicazioni.

È comunque importante avere la possibilità di confrontare soluzioni, modelli, scenari alternativi, motivando la scelta effettuata e discutendo gli effetti delle altre alternative possibili sulla valutazione globale e confrontando con le altre alternative ammissibili.

Un ottimo sistema per creare e valutare diversi scenari alternativi è quello di ricorrere a sistemi GIS (Geographic Information System), che possiedono importanti funzioni per il processamento e l'analisi di dati distribuiti nello spazio e costituiscono uno strumento per effettuare delle analisi sui domini omogenei e pesare quindi i parametri di instabilità, assegnando diversi livelli di suscettibilità. Inoltre, la disponibilità di DEM (Digital Elevation Models) consente di quantificare anche gli attributi topografici correlati all'instabilità dei versanti attraverso tecnologie GIS. Attraverso un DTM è infatti possibile individuare automaticamente le unità territoriali di riferimento e calcolare tutta una serie di parametri geomorfologici.

La tecnologia GIS consente di risolvere scenari di instabilità dei versanti alla scala cui è disponibile il DEM. Questa scala di mappatura consente di definire il rischio con un certo dettaglio, il che è molto utile nella gestione del territorio. Gli ultimi importanti contributi in questo settore si devono a Montgomery e Dietrich, (1994), che hanno messo assieme un modello idrologico stazionario basato sul contorno con un modello cinematica di pendio indefinito (semplificato per terreno incoerente) per definire delle classi di stabilità dei pendii sulla base della pendenza e di specifiche aree di alimentazione, ed a Wu e Sidle (1995), che hanno presentato un modello più elaborato che accoppia la modellazione dinamica dell'idrologia col modello di stabilità del pendio indefinito, in una forma più complessa, che tiene conto anche della coesione e della variazione della resistenza delle radici.

4.4 METODI DI ZONAZIONE SPAZIALE

In letteratura tecnica sono proposte metodologie di zonazione spaziale di pericolosità da frana, ciascuna delle quali presenta diverse potenzialità, specie se applicate con l'ausilio di tecniche GIS. Essi possono essere classificati come segue:

- *metodi* qualitativi (o diretti, o *euristici*);
 - Valutazione Empirica;
 - Indicizzazione degli Effetti;
 - Indicizzazione delle Cause;
- *metodi* quantitativi.
 - Analisi Statistica;
 - Analisi Morfometrica;
 - *metodi geotecnici, deterministici, o probabilistici*;
 - Analisi Deterministica;
 - Analisi Probabilistica;
 - Analisi Cinematica.
 - *metodi deterministici distribuiti* (Xie et al., 2003a).

4.4.1 METODI QUALITATIVI (*DIRETTI O EURISTICI*)

I *metodi qualitativi* danno una valutazione descrittiva e si basano sul giudizio di chi conduce lo studio di suscettibilità a frane (Van Westen et al., 1999). Essi sono molto usati per le analisi a larga scala per le quali non esistono molte altre tecniche concrete per lo studio della stabilità dei versanti.

Lo svantaggio principale è la soggettività della selezione dei dati e dei loro pesi, nella difficoltà a comparare carte prodotte da operatori diversi; inoltre, è concettualmente difficoltosa la procedura di aggiornamento della cartografia qualora siano disponibili dati più recenti o attendibili.

I dati di input, sulla cui base si giunge all'accertamento della suscettibilità ed alla sua zonazione, possono essere determinati da stime durante sopralluoghi ed osservazioni di campagna, con l'ausilio dell'interpretazione di foto aeree o dati da telerilevamento.

Il metodo euristico più semplice è il “**metodo geomorfologico**”.

La **valutazione empirica**: è una valutazione soggettiva sulla predisposizione all'instabilità dei versanti a partire dai dati raccolti nella cosiddetta "*carta inventario dei fenomeni franosi*" o in altre cartografie tematiche. Si ottiene in tal modo il più semplice tipo di "carta della pericolosità". Il risultato finale è spesso un ottimo elaborato cartografico, ma la tecnica è legata alla conoscenza del valutatore sull'area di studio, dunque rimane oscura e difficilmente ripetibile da altri, per cui i risultati non sono né riproducibili né confrontabili. In questo tipo di analisi l'utilizzo di tecniche GIS è molto ridotto, e può adattarsi per la costruzione di una banca dati che contenga tutti gli elementi descrittivi che sono stati raccolti per i singoli eventi franosi cartografati, la riclassificazione delle unità geomorfologiche in classi a diverso grado di pericolosità relativa, per La riclassificazione della originaria carta inventario delle frane sulla base di uno o più attributi assegnati o per l'esecuzione di operazioni di conteggio, o calcoli di statistica descrittiva sulle informazioni contenute nelle tabelle (area totale occupata dalle frane, numero totale di frane, densità areale di frana, numero di frane per km², superficie media in frana, tipologia più rappresentata, ecc.). Queste operazioni potranno essere eseguite considerando tutti i movimenti franosi congiuntamente oppure analizzando separatamente le diverse tipologie cartografate.

Nel **metodo di indicizzazione degli effetti** la probabilità relativa di frana può essere stimata con l'analisi della distribuzione dei fenomeni esistenti. In questo caso la zonazione della pericolosità non viene fatta con un'interpretazione soggettiva della carta-inventario, ma con una metodologia oggettiva e riproducibile da diversi operatori, che consiste nella determinazione (per ogni unità o sotto-unità elementare istituita) della percentuale di area interessata da fenomeni franosi. Si definiscono delle *densità areali* (percentuale di area in frana), e delle *isoplete* (curve di ugual percentuale di area in frana) o densità numeriche (numero di frane presenti nell'area) per ogni singola classe componente i tematismi utilizzati nello studio, sulla base della distribuzione dei fenomeni franosi presenti e passati. I sistemi GIS consentono di gestire efficacemente la carta relativa alla distribuzione spaziale degli eventi franosi e delle unità elementari in cui il territorio è stato suddiviso, di operare la sovrapposizione (*crossing*) tra i tematismi appena definiti e di rappresentare la variazione della percentuale di area in frana mediante isoplete.

Nel **metodo di indicizzazione delle cause** si ricavano degli indici di pericolosità relativa assegnando degli opportuni pesi alle classi considerate separatamente o in combinazione

fra loro. L'assegnazione di pesi ai fattori che, direttamente o indirettamente, contribuiscono all'instabilità dell'area può essere soggettiva (metodo diretto) oppure oggettiva, se supportata da chiare evidenze di carattere quantitativo (metodo indiretto).

Nel *metodo diretto* il risultato dell'analisi dipende esclusivamente dalle conoscenze del tecnico valutatore sulle correlazioni esistenti tra i fattori di controllo e l'evento franoso, analogamente a quanto già descritto per la valutazione empirica. Dunque si introduce un margine di soggettività ed arbitrarietà, in quanto è necessario definire le classi ed i criteri di classificazione, sia per i singoli fattori riconosciuti responsabili del movimento di versante, attribuendo dei valori ponderati e definendo l'ampiezza dell'intervallo numerico all'interno del quale scegliere il valore ponderato, sia per le variabili continue (pendenza, esposizione, quota, etc.) per le quali è necessario invece effettuare una classificazione ex novo.

Una volta classificate correttamente le variabili devono essere effettuate operazioni di sovrapposizione ed intersezione (*crossing*) delle carte recanti la distribuzione spaziale delle frane e dei diversi tematismi utilizzati. Seguono il calcolo della densità di frana, degli indici ad essa ricollegati e la riclassificazione delle carte tematiche iniziali con gli indici calcolati per ogni classe.

Giunti a questo punto si potrà scegliere se sommare i valori ponderati relativi a tutte le classi componenti le variabili considerate, sommare solo le classi che mostrano i valori ponderati più elevati o combinare tra di loro (attraverso operazioni di intersezione) un certo numero di classi considerando il risultato finale come una nuova variabile indipendente.

I valori ponderali totali saranno positivi per le aree che vengono previste in frana e negativi per le aree previste non in frana.

Al termine è possibile classificare i valori ponderati totali in un appropriato numero di classi e valutare l'accuratezza dell'analisi attraverso la verifica di quattro condizioni:

- 1) *pixel* "osservati" in frana (F) e con valori ponderati (P+) positivi;
- 2) *pixel* "osservati" in frana (F) e con valori ponderati (P-) negativi;
- 3) *pixel* "osservati" non in frana (NF) e con valori ponderati (P+) positivi;
- 4) *pixel* "osservati" non in frana (NF) e con valori ponderati (P-) negativi.

Le condizioni 1) e 4) descrivono l'accuratezza della metodologia impiegata, mentre la condizione 2) rivela l'inaccuratezza insita nel metodo. La condizione 3), invece, deve essere valutata a parte, in quanto potrebbe rivelare un aspetto previsionale tutt'altro che trascurabile: la possibilità che l'area si trovi in condizioni critiche, cioè con alta

propensione al dissesto oppure che l'evento franoso si sia già verificato e abbia perso col tempo la propria evidenza morfologica, sfuggendo in tal modo al rilievo di terreno. Quest'ultima situazione è molto frequente in aree appenniniche, laddove le originarie caratteristiche morfologiche naturali possono essere artificialmente alterate nel tempo (principalmente con lavori agricoli).

In questi metodi i GIS possono essere ampiamente utilizzati per rappresentare la componente spaziale e descrittiva dell'informazione geografica raccolta, eseguire le operazioni di sovrapposizione ed intersezione (*crossing*) tra la carta recante la distribuzione degli eventi franosi ed i vari tematismi considerati nello studio, calcolare i valori di densità areale o numerica delle frane relativamente ad una certa classe tematica, realizzare le tabelle contenenti i valori ponderati che dovranno essere utilizzati per la riclassificazione delle originarie classi componenti i tematismi considerati nell'analisi, eseguire operazioni di riclassificazione e sommare tutte le carte riclassificate al fine di ottenere una carta finale della pericolosità in cui, in ogni punto, il valore della suscettibilità riportato corrisponde alla somma dei valori relativi a tutte le classi presenti in quel determinato punto geografico ed utilizzate nell'analisi. Il risultato finale potrà essere riclassificato in un numero adeguato di classi discrete.

4.4.2 METODI QUANTITATIVI (INDIRETTI)

I metodi *quantitativi* sono finalizzati alla stima quantitativa dei parametri predisposti il dissesto e forniscono dei risultati numerici (probabilità, fattore di sicurezza, etc.).

4.4.2.1 METODI STATISTICI

L'attribuzione di pesi su base soggettiva, principale limitazione dei metodi qualitativi, è superata tramite l'applicazione di **tecniche** di statistica tradizionale (metodi statistici).

Nei metodi statistici si correlano diverse associazioni di fattori predisponenti il dissesto, confrontando direttamente i parametri rappresentati nelle carte tematiche, con la distribuzione dell'occorrenza di frane osservate, eventualmente distinte per tipologia.

Si può procedere derivando o una funzione o un indice di previsione, a partire da una combinazione di fattori pesati.

La validità di tale metodologia è funzione della qualità e quantità dei dati a disposizione.

Il contributo relativo di ciascun fattore si ottiene per mezzo di analisi statistiche *bivariate* o *multivariate*, ed in questo settore il GIS semplifica le operazioni di overlaying. Questo spiega il perché, in un'epoca in cui le tecniche GIS hanno una diffusione sempre maggiore anche alcune tecniche statistiche stanno acquistando una popolarità sempre crescente.

L'analisi statistica di indicatori morfologici, geologici, idrogeologici, geotecnici, vegetazionali ed idrografici consente di ottenere modelli per la zonazione relativa della pericolosità. Tale metodologia è inoltre raccomandata dal servizio geologico per la realizzazione delle carte di pericolosità alla scala 1:50.000 (Amanti et al., 1992).

In generale i metodi di analisi statistica si basano sul seguente schema operativo:

- suddivisione del territorio in unità di terreno omogenee per morfologia, litologia, uso del suolo, etc.;
- attribuzione alle unità di terreno degli attributi di ogni fattore di instabilità mediante opportune variabili tra cui, l'acclività locale, la classe litologica, la classe di uso del suolo;
- elaborazione statistica dei dati mediante modelli multivariati (**metodi quantitativi statistici bivariati e multivariati**) regressivi o discriminanti;
- rappresentazione cartografica di un indice numerico di pericolosità relativa.

Dall'analisi statistica si deduce la probabilità di occorrenza di frane di neoformazione sulle diverse unità territoriali

L'analisi statistica bivariata consiste nel raccogliere ed analizzare, da un punto di vista prettamente statistico (descrittivo ed inferenziale), una serie di dati relativi sia alla frana sia al pendio (o più genericamente all'ambiente fisico) in corrispondenza del quale l'evento stesso si è verificato. I metodi di analisi bivariata risultano accomunati dalla possibilità di distinguere una variabile dipendente (in questo caso l'evento franoso) ed una variabile indipendente (ogni singola classe tematica componente una determinata variabile). L'importanza di ogni singolo fattore viene perciò analizzata separatamente, anche se permane la possibilità di trattare una specifica combinazione di più fattori alla stregua di un'unica variabile, analogamente a quanto osservato in precedenza.

L'analisi statistica multivariata determina la probabilità di occorrenza spaziale di depositi di frana all'interno delle unità territoriali elementari, sulla base di un insieme fattori di controllo che in genere sono variabili ambientali. Però il modello non dà alcun dettaglio sulla distribuzione delle frane all'interno dell'unità né alcuna indicazione sulla dimensione

e la cinematica degli eventi franosi verificatisi nel passato o di quelli che avranno luogo in futuro. Inoltre il modello si basa solo su variabili che predispongono la franosità (fattori “passivi”: caratteristiche litologiche, vegetazionali, morfologiche); mentre non include alcuna grandezza (intensità e durata di precipitazione, ecc.) in grado di determinare o favorire l’innescò degli eventi franosi (fattori di innescò) e consegue che il medesimo non è in grado di incorporare in forma esplicita la dimensione temporale degli eventi franosi.

La cartografia così ottenuta può tuttavia essere interpretata anche per prevedere i futuri movimenti franosi che, quando si verificano eventi in grado di innescare movimenti franosi (piogge intense e prolungate), avranno luogo con maggior probabilità in quelle unità territoriali caratterizzate da fattori geoambientali rivelatisi fortemente associati ai depositi franosi.

Il modello multivariato è genericamente costituito da una equazione (o funzione) lineare contenente tutti o in parte i tematismi i cui coefficienti saranno tali da garantire la massima capacità predittiva del modello stesso. Ovviamente, per la calibrazione del modello sarà necessario un set di dati inerenti alla franosità, ovvero si deve tarare il modello in funzione delle caratteristiche geo-ambientali più frequentemente associate, rispettivamente, ai versanti stabili e a quelli instabili.

Fra i metodi di analisi statistica multivariata si ricordano:

- la regressione multipla
- l’analisi discriminante.

Dell’analisi discriminante si dà una breve descrizione, in quanto verrà applicata nelle analisi del presente lavoro.

4.4.2.1.1 ANALISI DISCRIMINANTE

L’analisi discriminante, sulla base di una serie di osservazioni o misure effettuate su ciascun oggetto, discrimina tra due o più gruppi di oggetti.

Nel caso in esame, i gruppi sono costituiti dall’insieme delle unità territoriali interessate dalla presenza di accumuli di frana e dall’insieme di unità prive di corpi franosi. Le variabili discriminanti (o previsori) sono i fattori di controllo studiati.

Di fatto l’analisi discriminante utilizza una *funzione dei previsori* per riclassificare tutti gli oggetti (unità territoriali) in classi il più possibile simili ai gruppi predefiniti.

Per discriminare i gruppi, l'analisi discriminante utilizza delle funzioni lineari del tipo:

$$D_s = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + \dots + B_n \cdot X_n \quad (4.1)$$

in cui:

D_s è la funzione discriminante;

X_{ij} è il valore della j-esima classe della i-esima variabile;

B_k è il coefficiente calcolato in modo da garantire la massima capacità predittiva del modello stesso.

Il modello dell'analisi discriminante consta di tre passi successivi.

1. Individuazione di una soglia di percentuale di area in frana utile a classificare le Unità Territoriali (UT) in stabili o instabili, per definire i gruppi che l'analisi deve predire.
2. Individuazione della funzione discriminante che meglio permette di classificare le unità territoriali che abbiamo appena distinto in funzione della loro franosità, mediante una tecnica iterativa.
3. Interpretazione dei risultati. L'importanza delle diverse variabili nel modello quali previsori delle condizioni di stabilità delle Unità Territoriali è rappresentata dal coefficiente standardizzato, elevato o basso, positivo o negativo.

Per misurare il grado di successo del modello si possono usare alcuni indici statistici o altre tecniche:

- la matrice dei casi (unità territoriali) correttamente classificati
- il calcolo della λ di Wilk,
- il *Test Chi-quadrato*

In questo lavoro si utilizzerà la matrice dei casi (unità territoriali) correttamente classificati, che è l'indice statistico che riveste maggiore importanza. Sono possibili quattro situazioni:

- unità territoriali predette come stabili e prive di depositi franosi;
- unità territoriali predette come instabili e interessate da corpi di frana;
- unità territoriali predette come instabili ma prive di depositi franosi;
- unità territoriali predette come stabili e interessate da corpi di frana.

La percentuale di casi correttamente classificati è dato dalla somma dei casi di tipo 1 e 2 sul totale dei casi. Più è alto il valore e migliore è la *performance* del modello. Valori superiori all'80% vengono generalmente ritenuti ottimi. Gli errori del tipo 2 sono da imputarsi all'inaccuratezza del modello; gli errori del tipo 3, invece, devono essere presi in seria considerazione, perché hanno un aspetto previsionale tutt'altro che trascurabile: la possibilità che l'area si trovi in condizioni critiche, cioè con alta propensione al dissesto oppure che l'evento franoso si sia già verificato e abbia perso col tempo la propria evidenza morfologica, sfuggendo in tal modo al rilievo di terreno.

Il secondo metodo è il calcolo della λ di Wilk, cioè del rapporto di variabilità tra due gruppi e la variabilità totale. Un basso valore indica forti variazioni tra i gruppi e scarsa variazione all'interno dei singoli gruppi; $2 = 1$ indica che c'è una grande variazione tanto nell'ambito dei singoli gruppi quanto tra i gruppi (in altre parole la funzione non ha valore discriminante).

Infine, il *Test Chi-quadrato* serve a determinare se i due gruppi risultano significativamente diversi.

4.4.2.2 ANALISI MORFOMETRICA

Nell'*analisi morfometrica* si individuano degli "indici morfometrici" che poi vengono messi a confronto con la franosità dell'area per stabilire il peso che ciascuno di essi ha sulla stabilità dei versanti.

Gli indici morfometrici più importanti sono:

- La pendenza;
- La curvatura orizzontale e verticale;
- L'indice topografico di umidità;
- Il TRMI (Topographic Relative Moisture Index).

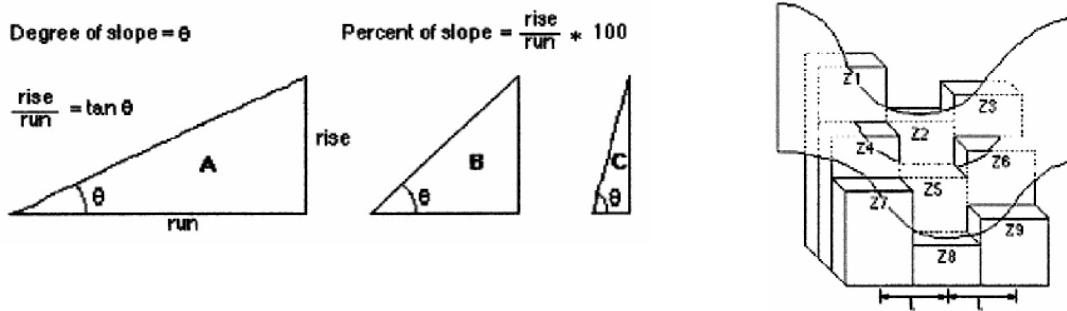


Figura 4.2: Definizione delle variabili morfometriche “pendenza” e “curvatura”.

La *pendenza*, espressa in percentuale, è la variabile morfologica più influente sulla stabilità del pendio, ma la sua influenza è legata alle tipologie di substrato. Inoltre ad essa sono legati i processi di erosione dovuti all’azione dell’acqua.

La *curvatura orizzontale* del terreno è la sezione normale tangente alle curve di livello e definisce la divergenza (valori positivi) o la convergenza (valori negativi) del flusso dell’acqua

La *curvatura verticale* è la sezione normale tangente alle linee di flusso e definisce la convessità (valori positivi) o la concavità (valori negativi) del profilo.

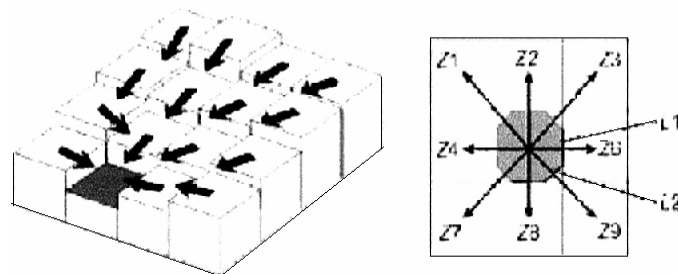


Figura 4.3 : Definizione della variabile morfometrica “Indice topografico di umidità”.

L’*indice topografico di umidità* (Topographic Wetness Index) descrive la tendenza del terreno ad accumulare acqua sulla base del suo aspetto morfologico. Esso si calcola come segue:

$$W = \ln \left(\frac{A_s}{\tan \beta} \right) \quad (4.2)$$

In cui A_s è l'area contribuyente di drenaggio sulla cella e β è l'angolo di pendenza.

L'accumulo di flusso è una variabile idrologica che esprime la superficie drenata a monte della stazione in esame e si correla quindi con la sua posizione morfologica.

Un altro indice morfometrico che desta un certo interesse nello studio della propensione al dissesto è il cosiddetto TRMI (Topographic Relative Moisture Index) (Parker, 1982). Esso prende in considerazione l'effetto che hanno sulla franosità di un'area i seguenti parametri:

- La densità di drenaggio
- I lineamenti geologici
- La presenza di strade.
- Le frane

4.4.2.2.1 RICERCA DI SOGLIE CLIVOMETRICHE

fra le unità litotecniche si individuano delle UCU (Unità a Condizioni Uniche) relativamente all'altezza e alla pendenza, verificando quali combinazioni hanno dato luogo ad instabilità e quali no ed individuando dunque delle soglie clivometriche.

La relazione acclività-franosità è supportata dalla geotecnica: tranne che per meccanismi di rottura molto particolari, il fattore di sicurezza di un pendio diminuisce all'aumentare dell'acclività. Però il metodo è stato criticato soprattutto dai geomorfologi, col supporto di una serie di lavori di geomorfologia applicata che dimostrano che la stabilità dei versanti non aumenta al crescere della pendenza. Piuttosto, nell'ambito di un'unità litologica omogenea, sembra esistere statisticamente un intervallo clivometrico entro cui si ha la massima incidenza delle frane. L'anomalia riscontrata nelle analisi geomorfologiche potrebbe essere imputata soprattutto ad una inadeguata definizione di domini litologici omogenei. Tali domini, infatti, dovrebbero essere definiti non tanto sulla base di criteri litostratigrafici bensì rigorosamente litotecnici.

La ricerca di soglie clivometriche o di relazioni altezza-pendenza dei pendii può essere supportata anche da considerazioni geotecniche di tipo deterministico, le quali non devono tuttavia sostituirsi all'indagine morfometrica ma ne devono costituire un completamento ed un controllo. In definitiva, i metodi morfometrici sembrano essere particolarmente efficaci per la zonazione della pericolosità relativa in zone non troppo estese, per le quali si

disponga di una buona conoscenza geotecnica. Essi infatti si basano sull'osservazione dell'effettivo comportamento dei pendii naturali alla quale può essere opportunamente associato un controllo deterministico basato sulle analisi geotecniche.

I metodi di analisi morfometrici possono essere utilizzati per back analysis al fine di determinare le proprietà geotecniche. I materiali più coesivi (roccia) daranno infatti delle curve altezza/inclinazione più ripide rispetto ai pendii costituiti da materiale poco coesivo.

4.4.2.2 RELAZIONE PENDENZA -PRECIPITAZIONE

Un'altra tipologia di analisi morfometrica finalizzata alla valutazione della pericolosità si basa sullo studio della relazione tra pendenza del versante e precipitazione (precipitazione media o intensità di precipitazione). In generale l'andamento della curva inclinazione/precipitazioni sarà come quello riportato in Figura 4.4.

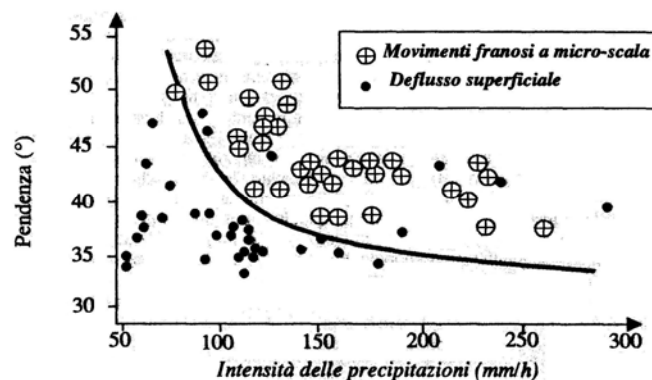


Figura 4.4: Andamento –tipo della curva inclinazione- precipitazioni.

4.4.2.2.3 RELAZIONE PENDENZA -TRMI

Manis et al. (2002) modellano i parametri che influenzano il movimento superficiale e subsuperficiale dell'acqua e la relazione fra l'acqua evaporata e l'acqua trattenuta dal terreno. A questo scopo si servono proprio del TRMI, che calcolano derivando dal DEM (Digital Elevation Model) la posizione relativa del versante, il gradiente di pendenza, la forma del versante e l'esposizione dello stesso. Questo indice però è significativo solo in aree non eccessivamente acclivi: in caso di maggiori acclività Parker (1982) propone di applicare dei pesi relativi a ciascuno di tali fattori.

Manis et al. (2002) propongono alcune variazioni alla formulazione originale di Parker. Innanzi tutto osservano che l'umidità relativa del terreno è legata sia alla pendenza che all'esposizione del terreno, per cui assegnano un peso in funzione della maggiore o minore esposizione ai raggi solari. La seconda modifica proposta riguarda la differente scala di pesi relativa all'umidità che anziché avere un range da 0 a 60 (dal più asciutto al più umido) avrà un range da 1 a 27.

Il secondo passo consiste nella creazione di un "landform position model" che fa uso del TRMI e dei confini del versante. Le classi di posizione del versante, (LPCs) sono definite attraverso la posizione topografica, l'acclività ed il gradiente relativo di umidità, senza tener conto di processi o condizioni climatiche.

Gli altipiani hanno valori medi del TRMI e bassi angoli di pendenza. Le valli o i bacini hanno alti valori di TRMI e bassi valori di pendenza. Le classificazioni sono come nella seguente Tabella 4.1:

Tabella 4.1: Landform Position Classes (LPCs)

Landform Position Class		Limiti di pendenza [°]	TRMI corretto
1	Pianure vallive	< 3	TRMI > 22
2	Piedi di versanti debolmente acclivi, zone di accumulo	3-10	TRMI > 18
3	Creste di versanti debolmente acclivi, zone di alimentazione e colline	3-10	TRMI ≤ 18
4	Terrazzi quasi a livello e plateaux	< 3	TRMI ≤ 22
5	Versanti ripidi molto umidi	10-35	TRMI ≥ 18
6	Versanti ripidi moderatamente umidi	10-35	TRMI 11-17
7	Versanti ripidi moderatamente asciutti	10-35	TRMI 4-10
8	Versanti ripidi molto asciutti	10-35	TRMI < 4
9	Scarpate e colline esposte al freddo	> 35	TRMI > 10
10	Scarpate e colline esposte al caldo	> 35	TRMI ≤ 10

I limiti di pendenza per l'LPC sono stati determinati empiricamente, utilizzando come primo approccio quello proposto dal "The Nature Conservancy's Ecological Land Unit (ELU)" (The Nature Conservancy unpublished manuscript).

Infine i valori di LPCs vengono riclassificati in EPLCs (Ecologically Predictive Landform Classes) mediante una stratificazione di media zona climatica (detta *life zone*).

4.4.2.3 METODI GEOTECNICI

I *metodi geotecnici* per le analisi di stabilità dei pendii sono fondati sulla legge fisica di conservazione della massa, dell'energia e del momento. Esistono metodi geotecnici *deterministici* o *probabilistici*.

4.4.2.3.1 METODI GEOTECNICI DETERMINISTICI

Le analisi deterministiche sono applicabili nel descrivere il grado di stabilità a scala di versante ma possono essere utilizzate anche in analisi distribuite a scala di bacino.

Nei *metodi geotecnici deterministici* la pericolosità relativa da frana viene espressa mediante un valore numerico che prende il nome di “Fattore di Sicurezza”, e che si calcola avendo a disposizione dati geometrici, parametri di resistenza a taglio ed informazioni sulla distribuzione della pressione interstiziale all'interno del versante in vari punti di riferimento. I parametri richiesti si possono determinare mediante indagini in situ o di laboratorio.

La letteratura tecnica offre molte alternative di calcolo: il modello cinematico più semplice è quello del pendio indefinito. Esistono poi alcuni modelli che ipotizzano che la cinematica del versante abbia natura traslativa ma con cuneo di rottura di volume finito, ed altri che ipotizzano una cinematica rotativa e suddividono il corpo di frana in conci per calcolare il fattore di sicurezza. La maggior parte dei modelli fisici utilizzati in ingegneria civile e geotecnica sono legati al sito di applicazione e non prendono in considerazione la distribuzione spaziale dei parametri di input.

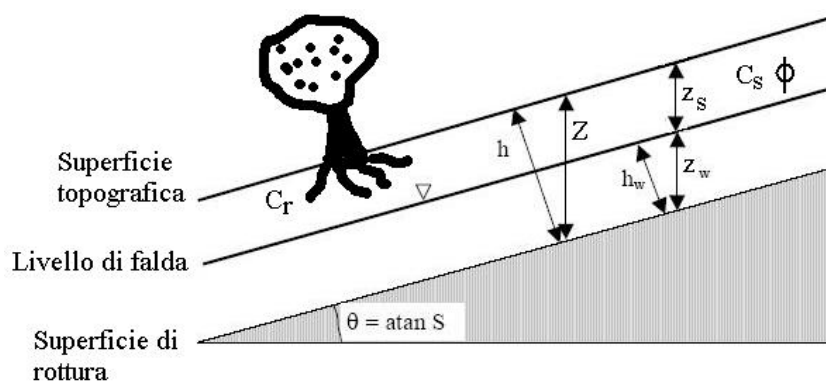


Figura 4.5: Lo schema del pendio indefinito con i parametri coinvolti.

Per quanto riguarda il **modello di pendio indefinito**, che sarà quello che si applicherà nel presente lavoro, si ricorda che esso si basa sull'equilibrio fra le componenti instabilizzanti legate alla gravità, e/o alle sollecitazioni sismiche, e le componenti stabilizzanti, legate alle caratteristiche di resistenza a taglio (coesione ed angolo di attrito interno) lungo la superficie di scorrimento, che si ipotizza parallela all'estradosso del versante, trascurando gli effetti di contorno, in quanto il modello presuppone che la resistenza al movimento lungo i fianchi o alla fine della frana non sia significativa.

La pressione interstiziale, dovuta all'umidità del terreno, riduce lo sforzo normale efficace, cui è legata la resistenza a taglio. La pressione interstiziale viene presa in considerazione assumendo uno stato idrologico stazionario in cui lo spessore dello strato saturo viene calcolato come sufficiente a sostenere uno scarico laterale proporzionale all'area di alimentazione specifica (l'area al di sopra del pendio per unità di lunghezza di contorno).

Il fattore di sicurezza per il modello di pendio indefinito (semplificato, con la stessa densità umida e asciutta) (Hammond et al., 1992) è il seguente:

$$FS = \frac{S}{\tau} = \frac{C_r + C_s' + \cos^2 \vartheta \cdot (\gamma_s \cdot (z - z_w) + (\gamma_s - \gamma_w) \cdot z_w) \cdot \tan \varphi'}{\gamma_s \cdot z \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \vartheta} \quad (4.3)$$

in cui:

FS = fattore di sicurezza

C_r [kPa] = coesione delle radici

C_s' [kPa] = coesione del terreno

γ_s [kN/m³] = peso dell'unità di volume del terreno.

γ_w [kN/m³] = peso dell'unità di volume dell'acqua

z [m] = profondità verticale della superficie di scivolamento al di sotto della superficie del terreno

z_w [m] = altezza della falda al di sopra della superficie di rottura.

ϑ [°] = angolo di pendio. ϑ è l'arcotangente della pendenza S espressa in gradi decimali

φ' [°] = angolo di resistenza ai taglio in condizioni efficaci.

I parametri che devono essere inseriti in un modello di pendio indefinito sono:

- la coesione del terreno e delle radici, che può essere determinata in laboratorio attraverso prove di taglio oppure derivata da carte dei suoli, carte litologiche, carte della vegetazione e carte dell'uso del suolo;
- il peso dell'unità di volume del terreno;
- l'angolo di resistenza al taglio, che può essere determinato sperimentalmente attraverso prove di taglio oppure derivato da carte tematiche;
- l'inclinazione del pendio, che viene calcolata da un Modello Digitale del Terreno;
- l'altezza di falda, che deve essere calcolata da un modello idrologico;
- la profondità del suolo, che può essere rilevata sul terreno o derivata da carte tematiche.

Per l'applicazione del modello bisogna determinare il livello atteso di falda associato ad un certo valore di precipitazione. Questo si può ottenere con un modello idrologico, nel quale si devono modellare i meccanismi di infiltrazione, flusso superficiale (*runoff*) e flusso subsuperficiale.

Uno dei caposaldi di sviluppo nella idrologia recente è stato la definizione del parametro 'a', "area contribuyente specifica" (Beven e Kirkby, 1979), definito come area di raccolta a monte per unità di larghezza lungo le isoipse [m^2/m], ovvero l'area al di sopra della linea versante per unità di lunghezza del contorno [m^2/m] è stato

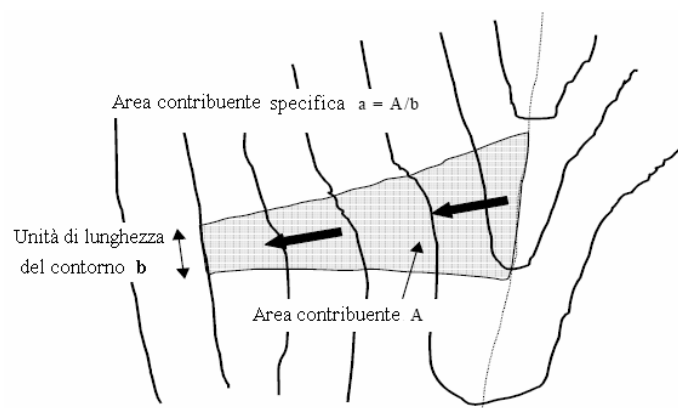


Figura 4.6: Definizione di area contribuyente specifica.

Questo principio deriva dall'evidenza sperimentale secondo cui le aree a maggiore umidità sono le aree di convergenza del deflusso, per le quali maggiore è l'area contribuyente.

Inoltre si è riconosciuto che le aree di convergenza di deflusso sono quelle in cui più frequentemente si generano le frane superficiali (Montgomery & Dietrich, 1994).

A partire dal modello di Beven & Kirkby (1979) sono stati recentemente sviluppati modelli idrologici in formato raster che possono essere accoppiati efficacemente al modello di pendio indefinito per le applicazioni GIS.

L'umidità relativa in ogni punto si ricava assumendo un modello idrologico stazionario basato sulla topografia, con le seguenti ipotesi di base:

- (1) il deflusso subsuperficiale laterale segue i gradienti topografici: questo implica che l'area contribuente al flusso in ogni punto è l'area di alimentazione specifica, definita a partire dalla topografia superficiale e ricavabile dal Modello Digitale del Terreno;
- (2) il deflusso laterale in ogni punto è in equilibrio, con la ricarica stazionaria R (espressa in m/h) data dalle precipitazioni efficaci nell'area contribuente (le precipitazioni efficaci sono espresse dalle precipitazioni meno l'evapotraspirazione, il deflusso superficiale e l'infiltrazione nel substrato);
- (3) La capacità di deflusso laterale in ogni punto è $T \cdot \sin \theta$, in cui $T [m^2/h]$ è la trasmissività del terreno, cioè la conduttività idraulica (o permeabilità media della sezione) $[m/h]$ moltiplicata per lo spessore del terreno $h [m]$.

Le ipotesi (1) e (2) messe assieme implicano che lo scarico laterale q , integrato nello spessore all'unità di lunghezza del contorno $[m^2/h]$ sia:

$$q = R \cdot a \quad (4.4)$$

Nell'ipotesi (3), a differenza di quanto si fa in TOPMODEL, non si è ipotizzato che la conduttività idraulica decresca con la profondità, ma che sia uniforme lungo tutta la coltre sovrastante il bedrock impermeabile. Inoltre si usa $\sin \theta$ anziché $\tan \theta$, il che è più corretto, in quanto la distanza percorsa dal flusso è lungo il pendio. La differenza fra il seno e la tangente è insignificante per angoli piccoli, mentre per pendii molto acclivi ha importanza.

Nell'ipotesi (3), considerando che il massimo valore di umidità relativa corrisponde con la saturazione del terreno, per cui $w = 1$, e che ogni eccesso si trasforma in ruscellamento superficiale, il parametro w è calcolato con l'equazione:

$$w = \text{Min}\left(\frac{R \cdot a}{T \cdot \sin \vartheta}, 1\right) \quad (4.5)$$

dove a rappresenta l'area contribuente specifica (area di raccolta a monte per unità di larghezza lungo le isoipse [m^2/m]).

L'umidità relativa definisce la profondità relativa del livello di falda che risale all'interno dello strato di terreno.

Il valore di umidità relativa calcolato con l'equazione 5.5 può essere inserito nell'equazione 5.3, relativa al modello di pendio indefinito, al fine di determinare il fattore di sicurezza.

$$FS = \frac{C + \cos \vartheta \cdot [1 - w \cdot r] \cdot \tan \varphi}{\sin \vartheta} \quad (4.6)$$

dove: $w = \frac{z_w}{Z} = \frac{h_w}{h}$ è l'umidità relativa;

$C = \frac{C_r + C_s'}{h \cdot \rho_s \cdot g}$ rappresenta la combinazione della coesione del terreno e delle radici, resa adimensionale rispetto allo spessore perpendicolare del suolo,

$r = \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$ è il rapporto fra il peso di unità di volume dell'acqua e quello del terreno.

I modelli deterministici possono essere monodimensionali, bidimensionali o tridimensionali, a seconda della complessità del sistema di equazioni utilizzato per la risoluzione delle leggi fisiche che descrivono le condizioni di rottura, lo spostamento e l'arresto dei corpi in frana. Per la risoluzione di queste leggi viene richiesta la conoscenza di dati geotecnici o geomeccanici puntuali specifici per le diverse tipologie di frana (crolli, scivolamenti, colate, etc.). Per ottenere questi dati si richiedono pertanto rilevamenti in sito e prove di laboratorio. Per queste ragioni, i modelli deterministici sono stati per lo più applicati su siti specifici e per fenomeni particolari (scala di versante), e non sono stati considerati adatti per effettuare una reale valutazione spaziale della pericolosità.

Con lo sviluppo delle tecnologie GIS, negli ultimi anni, l'analisi deterministica è stata applicata anche a scala più ampia, elaborando il modello in formato raster. Infatti,

calcolando il valore del fattore di sicurezza per ogni singolo pixel è possibile produrre una carta della pericolosità connessa all'instabilità dei versanti utilizzando informazioni derivate da differenti carte di input, sempre in formato raster.

L'utilizzo di parametri derivati da carte tematiche comporta un certo grado di approssimazione che deve essere considerato nell'analisi dei risultati. Una ulteriore fonte di incertezza è legata alla variabilità spaziale dei parametri all'interno delle unità territoriali scelte per effettuare l'analisi. Per limitare questo margine di incertezza vengono comunemente utilizzati metodi probabilistici, che verranno descritti nelle pagine seguenti.

L'**indice di stabilità** è un particolare tipo di fattore di sicurezza, basato su un appropriato modello geotecnico e su determinati parametri fisici e meccanici.

Per definire l'indice di stabilità, si parte dalla definizione di Fattore di Sicurezza e si inserisce nella sua espressione, quella dell'indice di umidità:

$$FS = \frac{C + \cos \vartheta \cdot \left[1 - \text{Min} \left(\frac{R \cdot a}{T \cdot \sin \vartheta}, 1 \right) \cdot r \right] \cdot \tan \varphi}{\sin \vartheta} \quad (4.7)$$

le variabili a e ϑ derivano dalla topografia, mentre C , φ e $\frac{R}{T}$ sono parametri.

Il rapporto di densità, r , si considera costante e pari a 0,5. Le altre tre quantità hanno un certo grado di incertezza, per cui si definisce un limite superiore ed un limite inferiore. Formalmente tali limiti definiscono una distribuzione di probabilità uniforme, lungo la quale si ipotizza che tali quantità possano variare in maniera casuale.

Ponendo: $\frac{R}{T} = x$; $\tan \varphi = t$ e la distribuzione uniforme fra il limite inferiore ed il limite superiore come:

$$\begin{aligned} C &\sim U(C_1, C_2) \\ x &\sim U(x_1, x_2) \\ t &\sim U(t_1, t_2) \end{aligned} \quad (4.8)$$

lo scenario peggiore (il più conservativo) rispetto alla variabilità dei parametri ipotizzata è individuato dai valori più piccoli di C e t (cioè C_1 e t_1), e dal valore più alto di x (cioè x_2).

Le aree in cui anche in questo scenario $FS > 1$, secondo tale modello sono incondizionatamente stabili. Si definisce:

$$SI = FS_{\min} = \frac{C_1 + \cos \vartheta \cdot \left[1 - \text{Min} \left(x_2 \cdot \frac{a}{\sin \vartheta}, 1 \right) \cdot r \right] \cdot t_1}{\sin \vartheta} \quad (4.9)$$

Per le aree nelle quali il minimo fattore di sicurezza è inferiore a 1, c'è probabilità di frana. Si tratta di una probabilità spaziale dovuta all'incertezza (variabilità spaziale) di C , $\tan \varphi$ e T . Questa probabilità ha un elemento temporale nel fatto che R caratterizza un'umidità che potrebbe variare nel tempo. Quindi l'incertezza in x combina una probabilità sia spaziale che temporale.

Nelle regioni in cui $FS_{\min} < 1$ si definisce:

$$SI = \text{Prob}(FS > 1) \quad (4.10)$$

nella distribuzione di C , x e t (Equazioni 3.13). Il miglior scenario si ha quando $C = C_2$, $x=x_1$ e $t = t_2$, che comporta:

$$FS_{\max} = \frac{C_2 + \cos \vartheta \cdot \left[1 - \text{Min} \left(x_1 \cdot \frac{a}{\sin \vartheta}, 1 \right) \cdot r \right] \cdot t_2}{\sin \vartheta} \quad (4.11)$$

Nel caso in cui $FS_{\max} < 1$ si ha:

$$SI = \text{Prob}(FS > 1) = 0 \quad (4.12)$$

Per ottenere una classificazione delle condizioni di stabilità dei versanti con tecniche GIS bisogna inserire come dati di input la pendenza topografica e l'area di alimentazione specifica, che possono essere calcolati automaticamente a partire da DEM, ed i parametri meccanici (di resistenza al taglio) e climatici (parametri idrologici di umidità). La distribuzione di ciascuno di questi parametri nell'area di studio può essere riportata attraverso una griglia numerica. In output si ottiene una griglia nella quale, per ciascuna cella si ha un indice di stabilità del terreno.

È noto che i parametri meccanici e climatici sono affetti da incertezze, pertanto è utile inserirli sotto forma di range di variazione.

L'indice di stabilità può essere definito come la probabilità che una cella sia stabile, assumendo che per i parametri affetti da incertezze la distribuzione sia uniforme all'interno del range di incertezza. Il range di variazione è compreso fra 0 (il più instabile) ed 1 (il meno instabile). Nel caso in cui l'insieme di parametri più conservativo (cioè quello che porta alle massime condizioni di instabilità) porta comunque alla stabilità, l'indice di stabilità viene definito come il Fattore di Sicurezza (il rapporto fra le forze stabilizzanti e quelle instabilizzanti) in quell'area in corrispondenza al set di parametri più svantaggioso. Si ottiene un valore maggiore di 1.

L'Indice di Stabilità dà un'idea della magnitudo dei fattori instabilizzanti (ad esempio l'aumento dell'umidità del terreno causato dal drenaggio delle strade, il carico locale, oppure l'aumento della pressione interstiziale locale legato alla risalita capillare).

Tabella 4.2: Un esempio di definizione delle classi di instabilità

Condizione	Classe	Stato previsto	Range dei parametri	Possibile influenza di parametri non presi in considerazione nel modello
SI > 1,5	1	Zona Incondizionatamente stabile	Il range non può modellare instabilità	Affinché si verifichi instabilità bisogna che si verifichino fattori instabilizzanti significativi.
1,5 > SI > 1,25	2	Zona Moderatamente stabile	Il range non può modellare instabilità	Affinché si verifichi instabilità bisogna che si verifichino fattori instabilizzanti moderati.
1,25 > SI > 1,0	3	Zona Quasi-stabile	Il range non può modellare instabilità	Affinché si verifichi instabilità potrebbero essere sufficienti fattori instabilizzanti minori.
1,0 > SI > 0,5	4	Zona di soglia inferiore	La metà del range pessimistico è richiesto per l'instabilità.	Affinché si verifichi instabilità non è necessario che si verifichino fattori instabilizzanti.
0,5 > SI > 0,00	5	Zona di soglia superiore	La metà del range ottimistico è richiesto per la stabilità.	Fattori stabilizzanti potrebbero provocare la stabilità.
0,0 > SI	6	Zona Incondizionatamente instabile	Il range non può modellare stabilità	Affinché ci sia stabilità è necessario che ci siano fattori stabilizzanti.

I termini “soglia superiore” e “soglia inferiore” si usano per caratterizzare regioni nelle quali, in accordo con i range di incertezza dei parametri quantificati dal modello, la probabilità di instabilità è, rispettivamente, superiore, oppure inferiore al 50%. In tali

regioni non è richiesto che fattori esterni inducano fenomeni di instabilità. Si possono verificare condizioni di instabilità semplicemente a causa di una combinazione dei parametri all'interno dei contorni, con i quali si possono quantificare l'incertezza e la variabilità.

4.4.2.4 METODI DETERMINISTICI DISTRIBUITI

Nei “*metodi deterministici distribuiti*” i dati e dei parametri di input vengono inseriti attraverso mappe raster che considerano la loro distribuzione spaziale (Xie et al., 2003b). Le tecniche GIS sono molto utili per la loro applicazione, a condizione che non si tratti di modelli molto complessi. Quando si lavora all'interno di un GIS, spesso, si tende ad adottare modelli di pendio indefinito, ovvero modelli monodimensionali che rappresentano la potenziale rottura di lunghi versanti naturali lungo superfici di scorrimento parallele al piano di campagna. Tale modello va bene per scorrimenti superficiali, ma non per altri tipi di frane (Xie et al., 2003a).

Nello studio della stabilità dei pendii sono molto utilizzati modelli deterministici 2D, in cui ciascun pendio è inteso come “profilo del versante”; eppure tutte le frane hanno una geometria tridimensionale, che varia nello spazio anche su distanze molto brevi, per cui in teoria sarebbe opportuno utilizzare sempre modelli tridimensionali.

In letteratura tecnica esistono molti modelli per il calcolo 3-D della stabilità dei pendii, la maggior parte dei quali fanno uso di modelli di studio “a colonna”, che trascurano l'interazione fra le colonne adiacenti.

Xie et al. (2003a, 2003b, 2004a, 2004b, 2006), per il calcolo del fattore di sicurezza 3-D, propongono di utilizzare un modello deterministico di colonna 3-D (Hovland, 1977) in cui i dati di input possano essere inseriti mediante tecniche GIS. La ricerca della superficie di scorrimento critica avviene minimizzando il fattore di sicurezza 3-D con il metodo Monte Carlo. Poi si assume che la superficie di scorrimento abbia la forma di un ellissoide, che può essere variata in funzione dei parametri di resistenza dei vari strati coinvolti.

Nei calcoli di stabilità tridimensionale si ottiene solo un valor medio del Fattore di sicurezza 3D, in quanto non si tiene conto degli errori e delle incertezze sui parametri di input. Per questo si assiste ad un crescente sviluppo di tecniche statistiche (Joseph and Willian, 1998).

5 LA SCELTA DEI DATI DI INPUT

5.1 QUALITÀ DEI DATI E DIMENSIONI DEI FILES DI INPUT

La valutazione della pericolosità da frana trova il suo presupposto, a prescindere dal metodo utilizzato, nella qualità dei dati di base che riguardano il territorio in studio.

È doveroso fare un cenno alle tecniche più moderne per il rilievo del territorio, come ad esempio il telerilevamento, da satellite (Sarkar e Kanugo, 2005) o da camera aviotrasportata, o il Laser Scanner tridimensionale (Alessandri et al., 2005). Queste tecniche presentano il difetto di acquisire enormi quantità di dati: ad esempio, il laser scanner 3D utilizzato per il rilievo del territorio è in grado di acquisire informazioni metriche di oltre 1000 punti al secondo, basandosi sulla tecnologia TOF (time of flight) per un campo visivo di 40x40 gradi, consentendo di ottenere un dettaglio di rilievo straordinario. Comunque, oggi le tecnologie informatiche sempre più avanzate consentono di operare con dati telerilevati in maniera sempre più efficiente, e questo risulta importante specialmente nelle aree in via di sviluppo, dove non esiste una cartografia né di tipo tradizionale né, tanto meno, di tipo numerico.

Trattandosi di informazioni che hanno una grande variabilità sia nello spazio che nel tempo, l'utilizzo di sistemi GIS risulta molto importante per integrare i dati contenuti in differenti strati informativi e comprendere l'influenza relativa di ciascun parametro preso in considerazione con il verificarsi dell'evento franoso.

5.2 L'IMMAGAZZINAMENTO DEI DATI TOPOGRAFICI

Le strutture di immagazzinamento disponibili per la codifica digitale dei dati di input topografici prendono il nome di Digital Elevation Models. In letteratura esistono tre tipi di DEM:

- (1) i Grid Digital Elevation Models (DEMs), con struttura dati matriciale, nella quale l'elevazione topografica di ciascun pixel viene immagazzinata in corrispondenza di un nodo della matrice.
- (2) il Triangulated Irregular Networks (TINs), che contengono le coordinate XY e l'elevazione in nodi distribuiti in maniera irregolare nello spazio;
- (3) le Contour based storage structures, che contengono dati vettoriali lungo linee di contorno.

Gli aspetti teorici fino ad ora descritti potrebbero essere implementati in una qualsiasi di tali strutture, in quanto in tutte le tre strutture è possibile calcolare la pendenza e l'area di alimentazione specifica in maniera automatica.

Comunque in genere si sceglie di lavorare con DEM di tipo Grid, in quanto sono più semplici e meglio compatibili con le funzionalità GIS e perchè nel loro uso c'è molta più esperienza in letteratura.

5.3 LE BANCHE DATI DISPONIBILI

5.3.1 IL PROGRAMMA CORINE⁴ ED IL PROGETTO CLC⁵.

Il Programma CORINE è nato con lo scopo principale di ottenere informazioni ambientali armonizzate e coordinate a livello europeo. Esso è stato realizzato dal 1985 al 1990 dalla Commissione Europea. Il Programma CORINE raccoglie i dati geografici di base in forma armonizzata (coste, limiti amministrativi nazionali, industrie, reti di trasporto ecc.), e prevede l'analisi dei più importanti parametri ambientali quali:

- la copertura e uso del suolo (CORINE Land cover),
- le emissioni in atmosfera (CORINE Air),
- la definizione e l'estensione degli ambienti naturali (CORINE Biotopes),
- la mappatura dei rischi d'erosione dei suoli (CORINE Erosion).

Dal 1991 il Programma è stato esteso anche ai paesi dell'Europa Centrale e dell'Est Europeo.

Il progetto Corine Land Cover (CLC) ha l'obiettivo di fornire informazioni sulla copertura del suolo e sui cambiamenti nel tempo. Le informazioni sono comparabili ed omogenee per tutti i paesi aderenti al progetto (attualmente 31 paesi compresi anche alcuni del Nord Africa). La fotointerpretazione da immagini satellitari (Landsat 5 e 7) ha reso il costo del progetto sostenibile.

Il sistema informativo geografico si compone di 44 classi di copertura del suolo suddivise in 3 tre livelli (5 classi per il primo livello, 15 per il secondo livello e 44 per il terzo).

- **CLC 90⁶** è stata la prima realizzazione del progetto, condotta a partire dagli anni '80.
- Il progetto **I&CLC 2000⁷** è attualmente in corso di realizzazione.

⁴ Coordination of Information on the Environment

⁵ Corine Land Cover

⁶ Corine Land Cover 1990

⁷ Image 2000 e Corine Land Cover 2000.

5.3.2 IL PROGETTO IFFI⁸

Il Progetto IFFI (Inventario Fenomeni Franosi Italiani) nasce dalla presa di coscienza da parte di tutte le strutture dello Stato nazionali e locali con competenze nel campo della difesa del suolo derivata dal verificarsi dell'evento disastroso del 5 maggio 1998, che ha colpito severamente i comuni di Sarno, Siano, Quindici, Bracigliano e S. Felice a Cancellò nelle province di Salerno, Avellino e Caserta. Il terribile evento e la gravità delle sue conseguenze hanno innescato un impulso alle attività di conoscenza, pianificazione territoriale e riduzione del rischio da frana e idraulico.

Il Progetto, finanziato con fondi del Comitato dei Ministri per la Difesa del Suolo ex lege 183/89, e realizzato in collaborazione con le Amministrazioni Regionali e delle Province Autonome (da ora in poi Regioni per brevità), tramite la stipula di Convenzioni o Accordi di Programma tra l'ex Servizio Geologico Nazionale e le Regioni per la fornitura dei dati relativi ai rispettivi ambiti territoriali, ha come obiettivo principale quello di supplire alla scarsità di dati omogenei e condivisi sulla distribuzione dei fenomeni franosi sul territorio nazionale.

Per l'attuazione del Progetto, nel 1999 è stato creato un apposito Gruppo di lavoro tecnico composto da funzionari dell'ex Servizio Geologico Nazionale (ora APAT), delle Regioni, del CNR e delle Amministrazioni Statali interessate.

Il Gruppo di Lavoro, partendo dal documento redatto da SGN e CNR-GNDICI (Guida al censimento dei fenomeni franosi ed alla loro archiviazione, Miscellanea VII del Servizio Geologico Nazionale, 1996, Roma), ha elaborato le specifiche tecniche e l'attuale struttura del Progetto.

Il Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) costituisce il primo inventario omogeneo e aggiornato dei fenomeni franosi sull'intero territorio nazionale. Le amministrazioni locali, gli enti di ricerca e i tecnici operanti nel settore della progettazione e della pianificazione territoriale possono accedere on line alla banca dati.

Gli obiettivi del progetto IFFI sono i seguenti:

fornire un quadro certo ed aggiornato dei fenomeni di dissesto gravitativo sull'intero territorio nazionale attraverso la revisione e l'omogeneizzazione dei dati già disponibili e la loro integrazione nelle aree scarsamente indagate;

⁸ Inventario Fenomeni Franosi Italiani

realizzare un Sistema Informativo Nazionale costituito da una cartografia informatizzata alla scala 1:25.000 ed il relativo database alfanumerico e iconografico, contenente tutti i dati censiti sulle frane in Italia;

fornire un contributo conoscitivo nel quadro più ampio degli strumenti necessari alla pianificazione territoriale a scala nazionale, nella valutazione qualitativa, quantitativa e tipologica del rischio per frana.

Nell'ambito del Progetto IFFI, il Dipartimento Difesa del Suolo dell'APAT ha svolto una funzione di ideazione, organizzazione e coordinamento delle attività, ed è tutt'ora impegnato nella realizzazione e diffusione di applicativi e documenti tecnici di supporto alle Regioni per garantire un'elevata qualità del dato. In particolare uno staff del Dipartimento è impegnato nell'attività di verifica di conformità dei dati alfanumerici e cartografici forniti dalle Regioni/Province autonome.

E' attualmente in corso di realizzazione il Sistema Informativo Nazionale del Progetto IFFI che permetterà le funzioni di aggiornamento, elaborazione, restituzione a differenti scale ed un confronto con altri livelli informativi quali il CARG, Aree a rischio idrogeologico (PAI), etc.

5.3.3 LA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA IN SCALA 1:100.000

La Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000 è l'unica Carta Geologica ufficiale presente sul territorio nazionale. La sua realizzazione ebbe inizio nel 1877 e si cominciò dalla Sicilia, per l'importanza geologico-mineraria della regione. I primi Fogli furono pubblicati nel 1884-1886. Poi nel 1888 furono pubblicati i fogli relativi alla Campagna Romana e fra il 1895 ed il 1900 quelli della Calabria. Ma le condizioni politico –economiche prima e poi lo scoppio della Prima Guerra Mondiale bloccarono i lavori, fino a quando il R.D. n°346 del 17/02/1927 (Riordinamento del Servizio Geologico dello Stato) fece riprendere l'attività del Regio Ufficio Geologico, che in collaborazione col Magistrato delle Acque produsse la Carta delle tre Venezie. L'attività si interruppe nuovamente con la Seconda Guerra Mondiale, per poi riprendere con la “Legge Sullo” (Legge 3 gennaio 1960, n° 15), che prevedeva la ripresa dei rilevamenti, con la collaborazione delle Università, di Enti pubblici e privati e da parte delle Regioni Autonome Sicilia e Sardegna, sempre con la supervisione del Comitato Geologico. Con la Legge 2 febbraio 1960 n° 68, il Servizio Geologico viene incluso fra gli organi cartografici dello Stato. Da questo momento in poi riprende la pubblicazione dei fogli, che si conclude nel 1976, con la pubblicazione di 276 fogli su 277 (il Foglio n° 181, Tempio Pausania, non è mai stato pubblicato).

A causa della disomogeneità delle carte e dalle incoerenze topologiche e di legenda tra un foglio e l'altro si è reso necessario aggiornare la Cartografia ufficiale Geologica d'Italia attraverso il progetto CARG, ovvero la Carta Geologica e Geotematica alla scala 1:50.000. (http://www.apat.gov.it/site/files/SuoloCARG/carg_agg_sett_05.gif).

5.4 I DATI UTILIZZATI

In questo lavoro si è scelto di operare con dati provenienti da banche dati disponibili sull'intero territorio nazionale, senza richiedere ulteriori indagini ad hoc.

Si è deciso di utilizzare i seguenti dati:

- **Area di studio:** Foglio n° 250, Castelnuovo di Garfagnana, scala 1:50.000.
- **Base topografica IGM** in formato raster in scala 1:25.000,

Per l'Emilia Romagna si sono prese le tavolette:

96 I SE;

97 III NO; 97 III NE

97 IV NE; 97 III SO; 97 III SE

Per la Toscana si sono prese le tavolette:

96 I SE;

96 II NE; 96 II SE.

97 III NO; 97 III NE; 97 III SO; 97 III SE

97 IV SO;

104 I NE

105 IV NO; 105 IV NE.

- **Modello Digitale del Terreno (DTM)** IGM, risoluzione 20x20 derivato dalle isoipse in scala 1:25.000, in formato raster.
- **Carta Geologica d'Italia** in scala 1:100.000, Fogli, n° 96, 97, 104 e 105, in formato vettoriale.
- **Litologia** proveniente da una semplificazione della Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000 Fogli, n° 96, 97, 104 e 105, in formato vettoriale.
- **Archivio IFFI** (Inventario Fenomeni Franosi Italiani), poligoni e punti, in formato vettoriale.
- **Carta di Uso del Suolo “Corine Land Cover”** (Regione Toscana e Regione Emilia Romagna) in scala 1:100.000, in formato vettoriale.
- **Idrografia IGM** delle province di Modena, Lucca, Pistoia, in scala 1:25.000 in formato vettoriale.

5.5 LA SCALA DI LAVORO

Nel presente lavoro si è scelto di operare in scala 1:50.000; questa scelta è nata da un compromesso tra una serie di necessità in parte tra loro contrastanti.

Sia le metodologie deterministiche che quelle statistiche non permettono un dettaglio spaziale molto spinto essendo vincolate alla disponibilità dei dati sul territorio. Se si disponesse di dati di dettaglio sarebbe più preciso effettuare una analisi geotecnica tradizionale anziché un approccio statistico o deterministico approssimato.

Le scale di lavoro più comunemente adottate per una carta di pericolosità per fenomeni franosi sono comprese tra 1:10.000 e 1:100.000: la scala 1:50.000 è una scelta intermedia

Inoltre il Servizio Geologico d'Italia - Dipartimento Difesa del Suolo, in qualità di organo cartografico dello Stato in base alla **legge 68/60**, ha il compito di rilevare, aggiornare e pubblicare la Carta Geologica d'Italia: il Progetto CARG, che prevede la realizzazione della cartografia geologica e geotematica è realizzato alla scala 1:50.000.

Ad esso è associata una banca dati ad elevato contenuto informativo dalla quale poter ricavare, all'occorrenza, anche carte geologiche e geotematiche di maggiore dettaglio che, contenendo numerose e preziose informazioni, potranno essere utilizzate per scopi applicativi anche prima della stampa dei fogli alla scala 1:50.000. Tutto ciò al fine di rendere disponibili strumenti conoscitivi per attuare una corretta pianificazione e gestione del territorio, in particolare per la riduzione e la mitigazione del rischio idrogeologico.

Era necessario utilizzare una scala di lavoro che potesse agevolmente essere utilizzata a livello nazionale anche se molti dei piani informativi utilizzati hanno un dettaglio superiore.

I dati utilizzati volutamente corrispondono ad una copertura minima diffusa a livello nazionale e pertanto disponibili ovunque, la finalità di questo lavoro è stata quella di confrontare una serie di elaborazioni statistiche e deterministiche su questi dati con una serie di elaborazioni di dettaglio effettuate sull'area test.

I risultati ottenuti sono comparabili con quelli provenienti da set di dati più completi e di maggior dettaglio confermando la validità delle scelte adottate.

6 L'AREA DI STUDIO

6.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il foglio 1:50.000 n° 250 comprende una vasta area dell'Appennino Settentrionale e comprende parte delle Alpi Apuane, la zona mediana della Val di Serchio e un ampio tratto del crinale appenninico tosco-emiliano, comprendendo la regione della Garfagnana (ad Est) e quella della Lunigiana (ad Ovest).

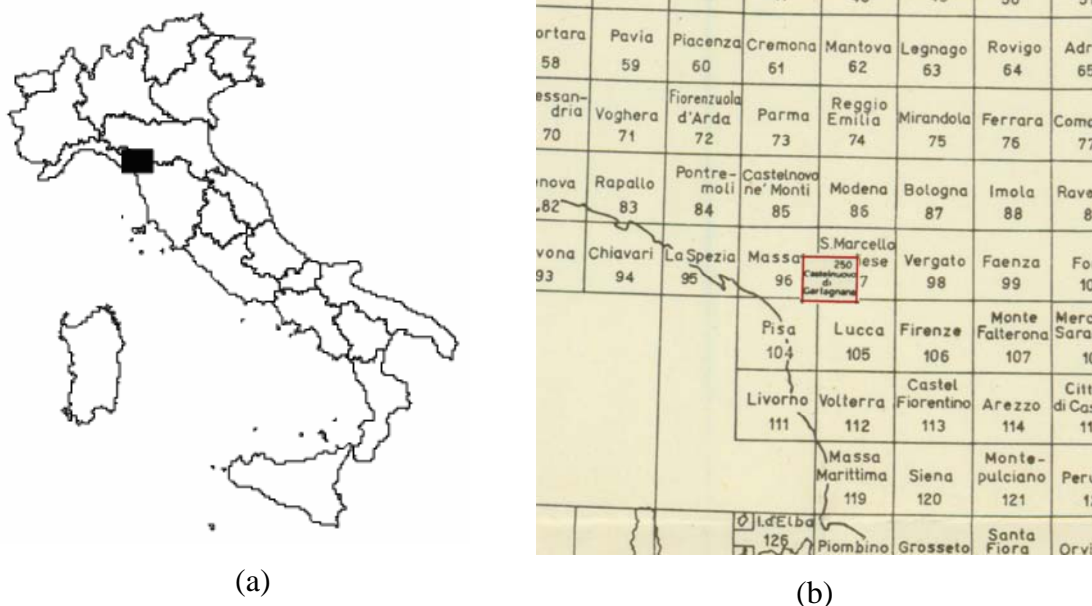


Figura 6.1: (a) Inquadramento geografico dell'area oggetto di studio: Il Foglio 250 "Castelnuovo di Garfagnana", si trova a cavallo fra la Regione Toscana e la Regione Emilia Romagna.

(b) Inquadramento geografico dell'area oggetto di studio: Il Foglio 250 "Castelnuovo di Garfagnana", in scala 1:50.000, nel Quadro di Unione della Carta Geologica d'Italia il scala 1:100.000 si trova a cavallo fra i Fogli 96, 97, 104 e 105.

Il territorio ricade per la maggior parte nella Regione Toscana, (Province di Lucca e Pistoia) e per circa il 20% nella Regione Emilia Romagna (Provincia di Modena).(**Figura 6.1a**).

La zona presenta un'alta propensione al dissesto, sia per ragioni geo-litologiche, in quanto nell'area affiorano, per vaste estensioni, formazioni caratterizzate da forte dominanza argillitica o argillosa, sia per le caratteristiche meteo-climatiche (alti valori delle piovosità

medie annue di 1500-2000 mm/anno, che sui rilievi maggiori possono raggiungere e superare 3000 mm/anno; piogge concentrate fino a 150 mm/ora) e geomorfologiche della regione (versanti molto acclivi, ringiovanimento morfologico legato ai più recenti sollevamenti tettonici). Si contano moltissimi fenomeni franosi in atto. Inoltre ampie zone, boschive, agricole o urbanizzate, hanno elevata suscettibilità ai dissesti.



Figura 6.2: Inquadramento geografico dell'area oggetto di studio: Il Foglio 250 "Castelnuovo di Garfagnana, in scala 1:50.000, nel contesto del Quadro di Unione della Carta Geologica d'Italia il scala 1:50.000.

6.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

6.2.1 DESCRIZIONE GENERALE

La geologia del Foglio 250 Castelnuovo di Garfagnana è stata studiata nell'ambito del progetto CARG (Puccinelli et al., 2003).

Il territorio oggetto di studio fa parte dell'Appennino Settentrionale, che ha andamento NW - SE e vergenza in direzione NE, comprende una successione di vari domini paleogeografici caratterizzati ognuno da una propria sequenza stratigrafica e da una propria storia. Nell'area affiorano le unità metamorfiche delle Alpi Apuane, la Falda Toscana e le Unità liguri e Subliguri (Unità Canetolo, Unità Ottone, Unità Gottero).

L'Appennino Settentrionale è una catena orogenica (Coli, 1992) strutturalmente complessa, formatasi a partire dal Cretacico superiore in seguito alla chiusura dell'Oceano Ligure - Piemontese ed alla susseguente collisione della placca Europea (Corso - Sarda) con quella adriatica (= Adria, Insubria). In questa complessa storia tettonica si possono distinguere una *fase oceanica*, che inizia al limite tra il Cretacico inferiore ed il Cretacico superiore, e termina nell'Eocene medio con la completa chiusura dell'Oceano Ligure - Piemontese ed una fase *intracontinentale*, che ha inizio nell'Eocene medio - superiore, con la collisione tra il margine continentale europeo (Sardo - Corso) e quello adriatico.

La strutturazione e la deformazione tettonica delle unità geologiche presenti è il prodotto di una complessa storia evolutiva polifasata [Elter, 1960, 1973; Dallon e Nardi, 1974, 1979; Boccaletti e Coli, 1985; Federici e Rau, 1980; Bartolini *et al.*, 1983; Boccaletti *et al.*, 1981, 1987], che schematicamente può essere ricondotta a due periodi principali.

- Dal Cretaceo superiore al Miocene superiore si ha uno stile eminentemente compressivo, responsabile dell'impilamento e della messa in posto di unità tettoniche provenienti da domini paleogeografici diversi (da ovest verso est: Dominio Ligure, Dominio Subligure, Dominio Toscano).
- Dal Miocene superiore al Pliocene inferiore la tettonica distensiva dà luogo alla formazione di depressioni tettoniche (Val di Serchio, Val di Magra, ecc.), nelle quali sedimentano potenti successioni fluvio-lacustri. Queste depressioni sono limitate da sistemi di faglie dirette, che generalmente hanno direzione

“appenninica” (NO- SE) e sono talora interrotte da dislocazioni trasversali, “antiappenniniche”.

Successivamente si sono verificati ulteriori movimenti differenziali, di sollevamento, abbassamento e basculamento, più significativi a partire dal Pleistocene medio [Federici e Rau, 1980; Bartolini et al., 1983; Puccinelli, 1987]; ad essi è seguito un rapido approfondimento del reticolo idrografico, con lo sviluppo di grandi dislivelli e un forte incremento dell’energia del rilievo. Alcune caratteristiche morfoneotettoniche (riattivazione dell’erosione fluvio-torrentizia, fasi di terrazzamento, sollevamento di depositi recenti, attività sismica, localizzazione degli epicentri dei terremoti) fanno ritenere che questi movimenti perdurino tuttora in vaste aree dell’Appennino settentrionale.

Nell’area oggetto di studio sono presenti molte unità tettoniche tipiche dell’Appennino Settentrionale.

Si riconoscono due grandi gruppi di domini: quello *Occidentale* ha un substrato costituito da crosta oceanica (Oceano Ligure - Piemontese); quello *Orientale* ha un substrato di crosta continentale (Adria).

Nell’Appennino Tosco - Emiliano si distinguono da Ovest verso Est cinque domini principali, dei quali, tre *oceanici* (uno delle Liguridi interne e due delle Liguridi esterne) e due *continentali* (Dominio Toscano e Dominio Umbro - Romagnolo e Marchigiano - Adriatico).

Nella zona di transizione tra i due gruppi si può distinguere un ulteriore dominio, il *dominio Sub - Ligure*, per alcuni limitato al solo *complesso di Canetolo*, per altri comprensivo anche del *Supergruppo della Calvana*.

6.2.2 SISMICITÀ DELL’AREA

Le sollecitazioni sismiche risultano essere un fattore di instabilità dei versanti (Keefer, 2002), quindi, in uno studio sulla pericolosità da frana, in teoria sarebbe necessario delineare le caratteristiche essenziali della sismicità.

La Regione Toscana ha recentemente varato il Programma VEL (Valutazione degli Effetti Locali), con lo scopo, di individuare le aree a diversa pericolosità locale nei comuni sismici della Lunigiana, Garfagnana e Media Valle del Serchio (Toscana nord-occidentale, province di Massa-Carrara e Lucca).

Nell'area si trovano diversi centri abitati storici, con edifici di pregevole fattura, alcuni dei quali di un certo valore storico. Cancelli et al. (2002) riportano lo studio di dettaglio sulle caratteristiche geologiche, geomorfologiche e litologico-tecniche della zona di Castelnuovo di Garfagnana (Lu), tramite rilievi di superficie, prospezioni sismiche e sondaggi geognostici, che hanno consentito di raggiungere un grado di conoscenza adeguato alle finalità del Programma VEL, nonché di fornire le basi indispensabili per la modellazione sismica del sito.

Tabella 6.1: Alcuni dei sismi più significativi della Garfagnana (da Cancelli et al., 2002).

Data	Intensità (M.C.S.)	Zona epicentrale
15-05-1481	VIII	Piazza al Serchio
06-03-1740	VIII- IX	Barga
19/23-07-1746	VIII	Barga
11-04-1837	IX	Alpi Apuane
10-06-1904	VIII	Appennino Modenese
07-09-1920	IX-X	Villa Collemandina
10-12-1937	VII	Appennino Modenese
15-10-1939	VII	Alpi Apuane
23-1-1985	VI	Garfagnana
10-2-1987	VI	Giuncugnano

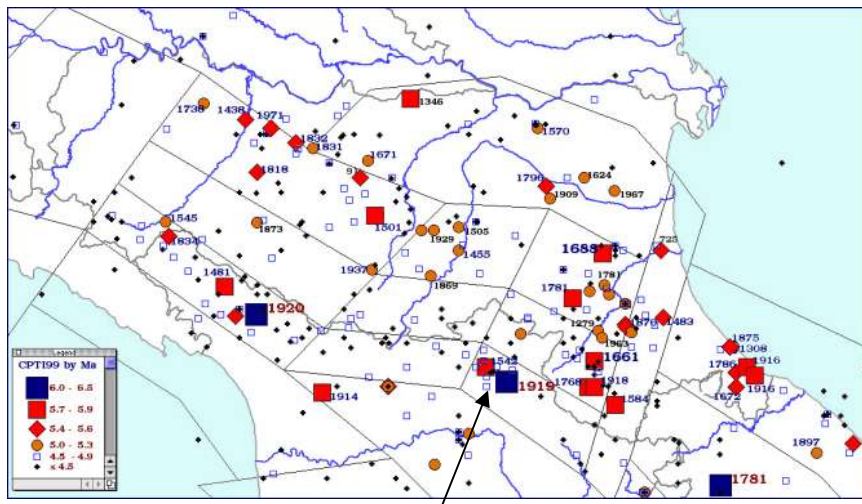


Figura 6.3: Catalogo CPTI, 1999

L'area della Garfagnana - Lunigiana è storicamente ad alto rischio sismico, come testimoniato da numerosi terremoti violenti verificatisi in tempi storici, che hanno raggiunto Magnitudo 6 - 6.3 e Intensità pari a IX - X MCS (Postpichl, 1985; Boschi et al., 1997). Tali eventi sono riconducibili a sorgenti attivate da meccanismi focali distensivi (faglie dirette e trascorrenti distensive).

In Tabella 4.1 sono riportati alcuni dei sismi più significativi della Garfagnana.

In particolare, in Garfagnana (**Figura 6.3**) si è verificato il più importante terremoto storico dell'Appennino Settentrionale (07/09/1920, $M_s = 6,3$) (Akinci et Alii, 2004; CPTI - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, 1999).

L'**utilizzo delle metodologie GIS** consente di localizzare rapidamente la posizione degli epicentri in relazione al settore in studio per definire le eventuali relazioni tra sismicità dell'area e franosità.



Figura 6.4. Epicentri dei forti terremoti italiani (CFTI, 1997)

Il CFTI (Catalogo dei Forti Terremoti Italiani, 1997) contiene i dati di Magnitudo, Intensità, coordinate geografiche ecc., dei più forti terremoti verificatisi dal 461 a. C. al 1990. Tali dati sono raccolti in un database, quindi possono essere facilmente utilizzati in un progetto GIS.

Sovrapponendo lo strato informativo degli epicentri con quello dei comuni italiani (Figura 6.3 e Figura 6.4) ed a quello dell'area di studio si può verificare che l'area epicentrale del più forte terremoto storico dell' Appennino Settentrionale, quello del 07/09/1920 in Garfagnana, rientra nell'area di interesse, e tale terremoto è stato responsabile della riattivazione della frana di Febbio in provincia di Reggio Emilia dove si è prodotto lo scivolamento dei depositi morenici sul substrato argillitico delle Unità Liguri.

6.2.3 FRANOSITÀ DELL'AREA

L'Appennino Settentrionale è una delle aree più franose d'Italia (Pellegrini, 1992). La grande diffusione dei dissesti è dovuta sia alla grande abbondanza di argille in molte delle formazioni affioranti, che favorisce lo sviluppo dei dissesti, sia al fatto che la catena Appenninica ha subito in tempi recenti forti dislocazioni verticali, che hanno creato morfologie giovanili e lontane da un equilibrio idrogeologico.

Le Unità Liguri, affioranti diffusamente nel Foglio 250 Castelnuovo di Garfagnana, sono interessate prevalentemente da scivolamenti rotazionali e colate.

La frana di Camporaghena (Lunigiana – Massa) è uno scorrimento rotazionale che interessa quasi esclusivamente la Formazione della “scaglia rossa” (Cretacico inferiore. – Oligocene); questa frana, in realtà, è un fenomeno complesso (Pochini et al., 1990) classificabile come scorrimento rotazionale multiplo e comprendente diversi dissesti in atto che complessivamente occupano un'area di circa 0,35 km².

I fattori innescanti i fenomeni franosi possono essere diversi: fattori climatici, eventi meteorologici, eventi sismici, etc.

Annunziati et al. (2002) riportano l'evento alluvionale di grande portata che nel Giugno 1996 ha interessato da un le Alpi Apuane, producendo complessivamente 647 frane di cui 450 di tipo soil slip - debris flows mentre, ed il resto classificabili come colate, frane traslazionali, frane roto-traslazionali e crolli (Varnes, 1996).

Il 19 Giugno 1996, circa 350 fenomeni di debris flows si sono sviluppati in un'area di 170 km². Le precipitazioni che hanno indotto i debris flows hanno avuto carattere di forte

intensità e breve durata (3 - 12 ore). L'intensità massima è stata registrata nei bacini del Cardoso, Mulina e Turrte di Galliciano ed è stata di 474 mm in 12 h (con un massimo superiore ai 158 mm/h) (D'Amato Avanzi et al., 2004).

I fenomeni di soil slip - debris flows, in termini litologici, per circa il 63% hanno interessato la Formazione metamorfica dello Pseudomacigno (arenarie metamorfosate e filliti), ed in generale hanno interessato rocce metamorfiche impermeabili e semipermeabili. In questo tipo di fenomeni, in genere, viene coinvolta la coltre detritica superficiale che ricopre le suddette litologie per uno spessore variabile da 0,5 m a 2 m e solo talvolta sono coinvolte porzioni del bedrock.

Infine bisogna aggiungere che la franosità dell'area, almeno relativamente alle frane di riattivazione, è legata alla sismicità: nel paragrafo relativo alla sismicità si è già detto che storicamente sono stati registrati anche eventi di forte Intensità, fra i quali merita particolare interesse il terremoto della Garfagnana, del 07/09/1920. Nel presente lavoro, tuttavia, non approfondiremo questo aspetto.

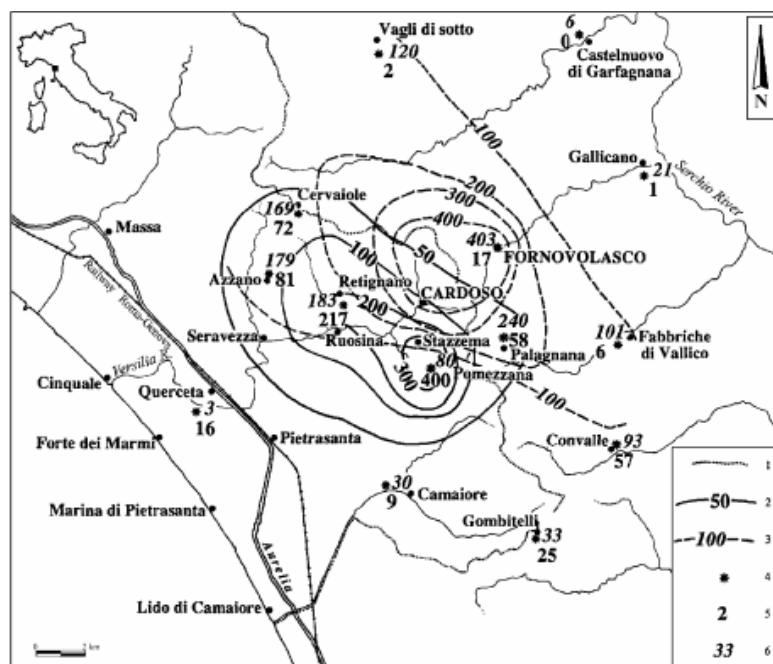


Figura 6.5: Carta delle isoiete – evento alluvionale del 19 Giugno 1996 (D'Amato Avanzi et Al., 2004)

6.3 STUDI ESISTENTI SULL'INSTABILITÀ DEI VERSANTI

Nel 1983 il CNR-GNDT (Gruppo Nazionale Difesa dai Terremoti) ha promosso i primi studi specifici sull'instabilità dei versanti relativi all'area del Foglio 250 Castelnuovo di Garfagnana, all'interno della linea di ricerca: "Previsione e prevenzione degli effetti dei sismi sulla stabilità dei pendii naturali" e "Zonazione sismica e riclassificazione sismica". Questi hanno portato alla redazione di Carte Geologiche e Carte della Franosità di vaste aree, selezionate fra quelle di maggior rilievo sociale, economico e ambientale.

In seguito altri studi sul rischio di frana in tale zona sono stati finanziati dal CNR-GNDCI (Gruppo nazionale Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche), o sono stati svolti nell'ambito delle attività dell'Autorità di bacino sperimentale del Fiume Serchio, ed hanno fornito prodotti cartografici e dati significativi sull'instabilità dei versanti nell'area del Foglio 250. I lavori più significativi sono, ad esempio, quelli di Nardi et al. (1986, 1987, 2000), Dallan et al. (1991), il Foglio 250 geologico di Puccinelli et al. (2003).

Bisogna anche parlare del Piano di Bacino Stralcio Assetto Idrogeologico (P.A.I.), relativo al Bacino pilota del fiume Serchio ai sensi delle leggi n. 183/1989 (articoli 17 e 18), n. 267/1998 (articolo 1, comma 1) e n. 365/2000 (articolo 1-bis, comma 1-bis). (GU n. 64 del 18-3-2005), consultabile, con la relativa documentazione, anche sul sito internet dell'Autorità di bacino del fiume Serchio all'indirizzo: www.serchio-autoritadibacino.it.

Infine, nel BURT⁹ n. 10 del 9-3-2005 è pubblicata la DELIBERAZIONE 1 febbraio 2005, n. 20 "Approvazione del piano di assetto idrogeologico per il bacino regionale pilota fiume Serchio", nella quale si dà atto che il piano stralcio per l'assetto idrogeologico nel bacino del fiume Serchio risulta costituito da:

1) Relazione

2) Elaborati cartografici:

- Carta dei limiti amministrativi del bacino del Fiume Serchio in scala 1:100.000
- Carta della franosità del bacino del Fiume Serchio (21 tavole in scala 1:10.000)
- Carta dei fenomeni franosi e della pericolosità geomorfologia (1 tavola in scala 1:50.000 e 4 tavole in scala 1:25.000)
- Carta delle aree di pertinenza fluviale e lacuale in scala 1:50.000

⁹ Bollettino Ufficiale della Regione Toscana

- Carta delle aree allagate e/o della pericolosità idraulica in scala 1:50.000
- Carta degli interventi per la riduzione del rischio idraulico in scala 1:50.000
- Carte di riferimento delle norme di piano nel settore del rischio idraulico (1 tavola in scala 1: 50.000 e 53 tavole in scala 1:10.000)
- Carta degli impianti idroelettrici in scala 1:100.000
- Delimitazione dell'area del bacino del lago di Massaciuccoli in scala 1:50.000

3) Norme di piano;

Relativamente al **rischio da frana**, nelle carte della franosità elaborate dall'Autorità di Bacino ed allegate al Piano sono state evidenziate le zone che per caratteristiche morfologiche e idrogeologiche sono predisposte al dissesto.

“In particolare nel progetto di Piano sono state perimetrate aree corrispondenti a quattro classi di pericolosità da frana: molto elevata; elevata; media e bassa.

La superficie totale delle aree in frana è di circa 111 km² (il 7% della superficie dell'intero bacino), dei quali 15,5 km² come frane attive e 94,3 km² come frane quiescenti. In particolare tra le frane censite sono state evidenziate 74 frane a rischio molto elevato (R4) ed elevato (R3) che richiedono interventi prioritari.

Esistono anche studi particolareggiati sulla stabilità di aree ristrette: ad esempio i lavori di D'Amato Avanzi et al. (1995, 1997, 1999, 2003), Cavedio et al. (1996, 1997), Castaldini et al. (1998).

La Regione Toscana ha promosso il Programma VEL (Valutazione degli Effetti Locali), in riferimento alla Legge Regionale n. 56 del 30/07/1997, che prevede interventi sperimentali di prevenzione per la riduzione del rischio sismico nell'area della Lunigiana e della Garfagnana, classificata come sismica fin dal 1927, comprendente 32 comuni, con una popolazione residente di circa 100.000 abitanti ed il cui patrimonio edilizio è stato realizzato per il 40% dopo il 1946.

Alla fine del 2000 la Giunta Regionale ha deciso di estendere il programma anche ai Comuni del Mugello, Valtiberina e Amiata (*Lo Presti e Ferrini, 2002*)

I 32 Comuni in Lunigiana e Garfagnana sono tutti classificati in II categoria (S=9). Gli studi, per volontà della Regione Toscana, sono stati mirati ad acquisire le caratteristiche del terreno sul quale si trova il centro urbano nelle varie epoche della sua espansione: dal primo nucleo di origine medievale, ai modesti ampliamenti dei secoli successivi, fino alle

più recenti espansioni, dunque non riguardano le aree non urbanizzate ed inoltre sono più concentrati nei centri urbani più significativi in termini di esposizione al rischio sismico.

Fra tali Comuni il caso meglio documentato è quello della microzonazione sismica (ground motion) del Comune Castelnuovo di Garfagnana. Cancelli et al. (2002) si sono occupati della geologia e della morfologia e della litologia dell'area comunale, *Calosi et al. (2002)*, si sono dedicati alla creazione di una banca dati informatica interdisciplinare, *Foti et al. (2002)* hanno descritto le indagini geotecniche e geofisiche eseguite ed alla definizione dei parametri del terreno per le analisi di risposta sismica ed infine, e *Lo Presti et al. (2002)* hanno definito l'accelerogramma di riferimento su roccia, hanno descritto i risultati delle analisi effettuate ed i criteri adottati per l'estensione dei risultati ottenuti all'intero territorio.

Annunzianti et. al. (2002) propongono uno studio mirato all'individuazione di alcune soglie critiche di intensità di pioggia connesse con l'innescò di debris flows che si sono manifestati in occasione del nubifragio del 19 giugno 1996 sulle Alpi Apuane. Si è osservato che il limite di intensità di precipitazione che ha indotto fenomeni di instabilità superficiale nell'area corrisponde localmente ad un tempo di ritorno di 20 anni. I valori di soglia individuato sono stati estesi, in via sperimentale, all'intero bacino del Fiume Serchio, modulandoli sulle caratteristiche climatiche locali per fare un primo riscontro relativamente a quanto avvenuto in corrispondenza dell'evento alluvionale del novembre 2000.

È a nostra disposizione lo studio "Pericolosità geologica connessa all'instabilità dei versanti", del foglio tematico 250, Castelnuovo di Garfagnana, a scala 1:50.000 redatto nell'accordo di programma fra la Regione Toscana ed il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pisa.

Sul sito web della Regione Toscana, alla pagina "Rischio Sismico", è consultabile una Banca dati che raccoglie una serie di sondaggi stratigrafici e di prove down hole, classificati in funzione dei Comuni in cui le indagini sono state svolte.

Si tratta di dati di origine molto eterogenea, alcuni sondaggi sono stati svolti all'interno del Progetto VEL, altri sono stati raccolti da indagini precedentemente svolte per altri scopi, ad esempio per la progettazione di edifici o altro.

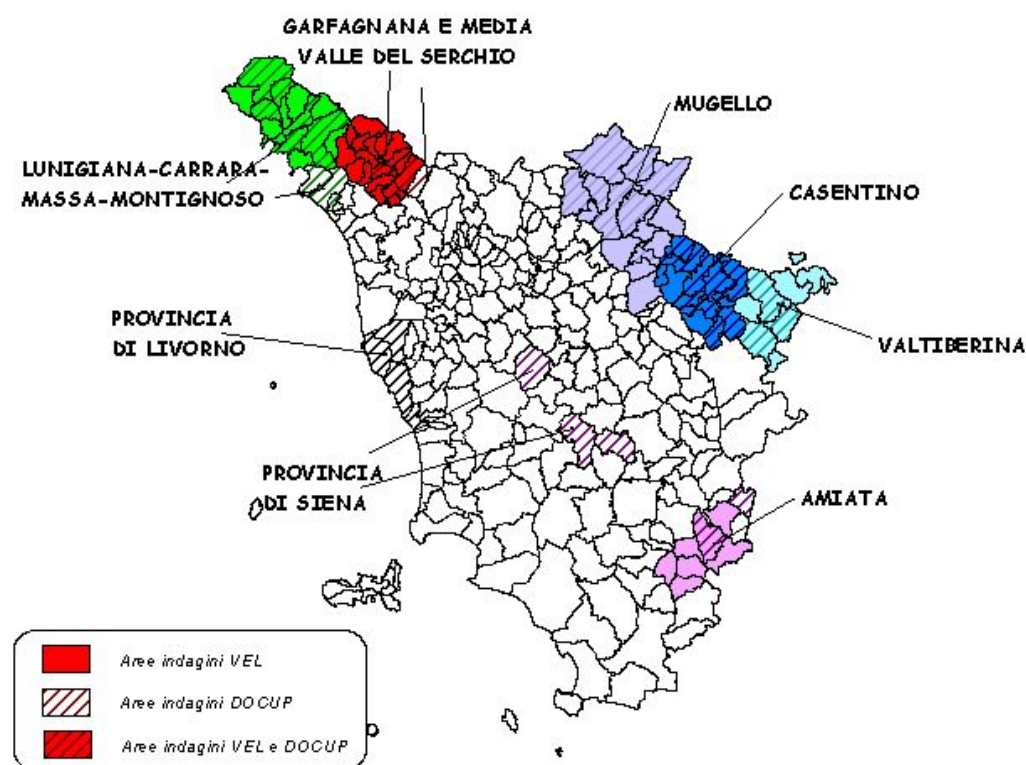


Figura 6.6: Le aree cui corrisponde la banca dati disponibile sul sito internet della Regione Toscana.

6.4 LA PREPARAZIONE DEI DATI DI INPUT

Dopo aver inserito nel progetto lo shape poligonale che riporta il contorno dell'area di studio (il Foglio n° 250, Castelnuovo di Garfagnana, scala 1:50.000) si è riportata una base topografica IGM in formato raster. Per ottenere un unico strato informativo si è fatta una mosaicatura delle tavolette necessarie a coprire interamente l'area di studio, con la funzione "Mosaic to new raster" e si è applicata la funzione "Extract by Mask" dello Spatial Analyst Tools, scegliendo come feature di ritaglio proprio la F250.shp.

In Figura 6.7 è riportato uno stralcio della base topografica utilizzata.

Come Modello Digitale del Terreno si è adottato il DTM dell'IGM con risoluzione 20x20, derivato dalle isoipse in scala 1:25.000, in formato raster, ritagliandone la porzione relativa al Foglio 250. In Figura 4.1 è riportata la visione "hillshade" del suddetto DTM.

Il grigliato regolare di quote è generato dall'orografia vettoriale (curve di livello e punti quota). I passi di scansione sono di 20 m, 1" e 3" e le rispettive unità di cessione sono 10

km per 10 km, 10' in longitudine per 6' di latitudine e 20' in longitudine per 12' in latitudine.

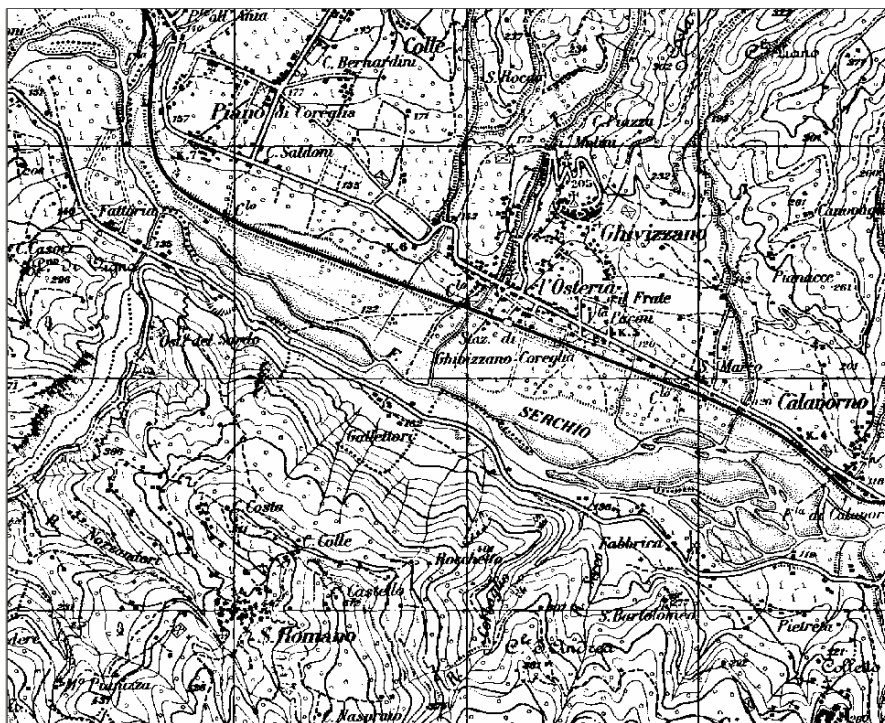


Figura 6.7: Stralcio della base topografica in scala 1:25.000 utilizzata.

La Geologia è stata presa dalla Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000, selezionando i quattro Fogli di interesse, i n° 96, 97, 104 e 105, facendo un'operazione di *merge* e successivamente un'operazione di *clip* secondo la sagoma del Foglio F250. In Figura 6.9 è riportata la carta Geologica ottenuta.

Nell'uso della Carta geologica d'Italia in scala 1:100.000, per ciascun foglio può accadere che lo stesso litotipo, in due fogli diversi venga indicato con valori dell'attributo CHIAVE_ULF differenti. Pertanto si è scelto di utilizzare il tema "Litologia" (Figura 6.10), proveniente da una semplificazione della Carta geologica d'Italia in scala 1:100.000, in quanto in tale tema la classificazione dei litotipi è univoca.

Si è discussa l'opportunità di fare un accorpamento dei litotipi in modo da ridurre il numero delle classi: gli accorpamenti proposti sono nella seguente Tabella 6.2.

Secondo questo schema si è svolta una riclassificazione delle aree. Lo scopo si è ottenuto manipolando la Attribute Table dello shape “lito250_leg”, creando un nuovo attributo “litotipi_e”, nel quale si è inserito il nuovo nome delle classi ottenute dagli accorpamenti.

Tabella 6.2: Accorpamenti fra le classi di litotipi proposta nel presente lavoro

litotipi_l	litotipi_n	litotipi_k	
1	calcilutiti, calcareniti, calciruditi; calcari dolomitici, calcari selciferi, dolomie, dolomie calcaree calcari marnosi, marne calcaree, alternanze calcari-marne, calcari- argille, dolomie-marne, dolomie- argille	calcari dolomie calcari marnosi	A1 A2 A3
2	radiolariti e diaspri trachiti; andesiti; trachiandesiti; latiti; trachiandesiti basaltiche; andesiti basaltiche quarzoliti, graniti, granito a feldspati alcalini, tonaliti, granodioriti gneise	diaspri Lave neutre rocce granitoidi gneiss	A4 D2 E1 F2
3	filladi, anfiboliti, argilloscisti, micascisti, parascisti, quarziti scistose, calcescisti, talcoscisti serpentiniti meta-sedimentarie, meta-magmatiche (metamorfiti di basso grado)	filladi e micascisti serpentiniti metamorfiti di basso grado	F1 F5 H1
4	terreni a granulometria mista (f+m+g) terreni granulometricamente indefiniti (conoidi, frane)	terreni a granulometria mista terreni a granulometria indefinita	B4 B7
5	marne, argilliti, siltiti	marne	A7
6	conglomerati, breccie, puddinghe	conglomerati	A8
7	terreni a granulometria media (m)	terreni prevalentemente sabbiosi	B2
8	terreni a granulometria grossolana (g), media-grossolana (m+g)	terreni prevalentemente ghiaiosi	B3
9	complesso pelitico-arenaceo, pelitico- arenaceo-conglomeratico, calcareo- marnoso-arenaceo	complessi pelitico- arenacei	A10
10	complesso calcareo (dolomitico) - arenaceo, calcareo (dolomitico)- marnoso-arenaceo	complessi calcareo- arenacei	A11
11	complesso indifferenziato; argille caotiche; argille varicolori; argille scagliose ecc.	argille caotiche	C1

Il tema “Idrografia (Figura 6.11) è stato creato a partire dagli strati informativi di Idrografia IGM delle Province di Modena, Lucca, Pistoia, in scala 1:25.000 in formato vettoriale, con una operazione di “merge” e la successiva operazione di “clip”.

Il tema “Uso del suolo” è stato ricavato dalla copertura “*Corine Land Cover*”. Il prodotto “Mappa di uso del suolo” è suddiviso per Regioni; per il presente lavoro si è fatto uso delle porzioni “Regione Toscana” e “Regione Emilia Romagna”.

A ciascun elemento della carta di uso del suolo *Corine Land Cover* sono associati tre codici: Codice_1, Codice_2 e Codice_3, che corrispondono ai tre livelli di dettaglio della legenda (Figura 6.12, Figura 6.13, Figura 6.14).

Si sceglie di lavorare al livello di dettaglio 1 (Figura 6.12), in quanto alla nostra scala di lavoro lavorare con un dettaglio maggiore non apporterebbe miglioramenti, ma certamente appesantirebbe molto i calcoli.

È stato creato un layer informativo che contiene le informazioni sulle frane dell'*archivio IFFI* (Inventario Fenomeni Franosi Italiani) (Figura 6.15); per quanto riguarda i poligoni delle aree in frana, fra quelli che rientrano del tutto o in parte nell'area del Foglio 250, si è fatta una distinzione fra quelle il cui punto di innesco è all'interno dell'area di interesse e quelle per le quali è all'esterno.



Figura 6.8: La visione Hillshade del DTM dell'area di studi (F250) (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

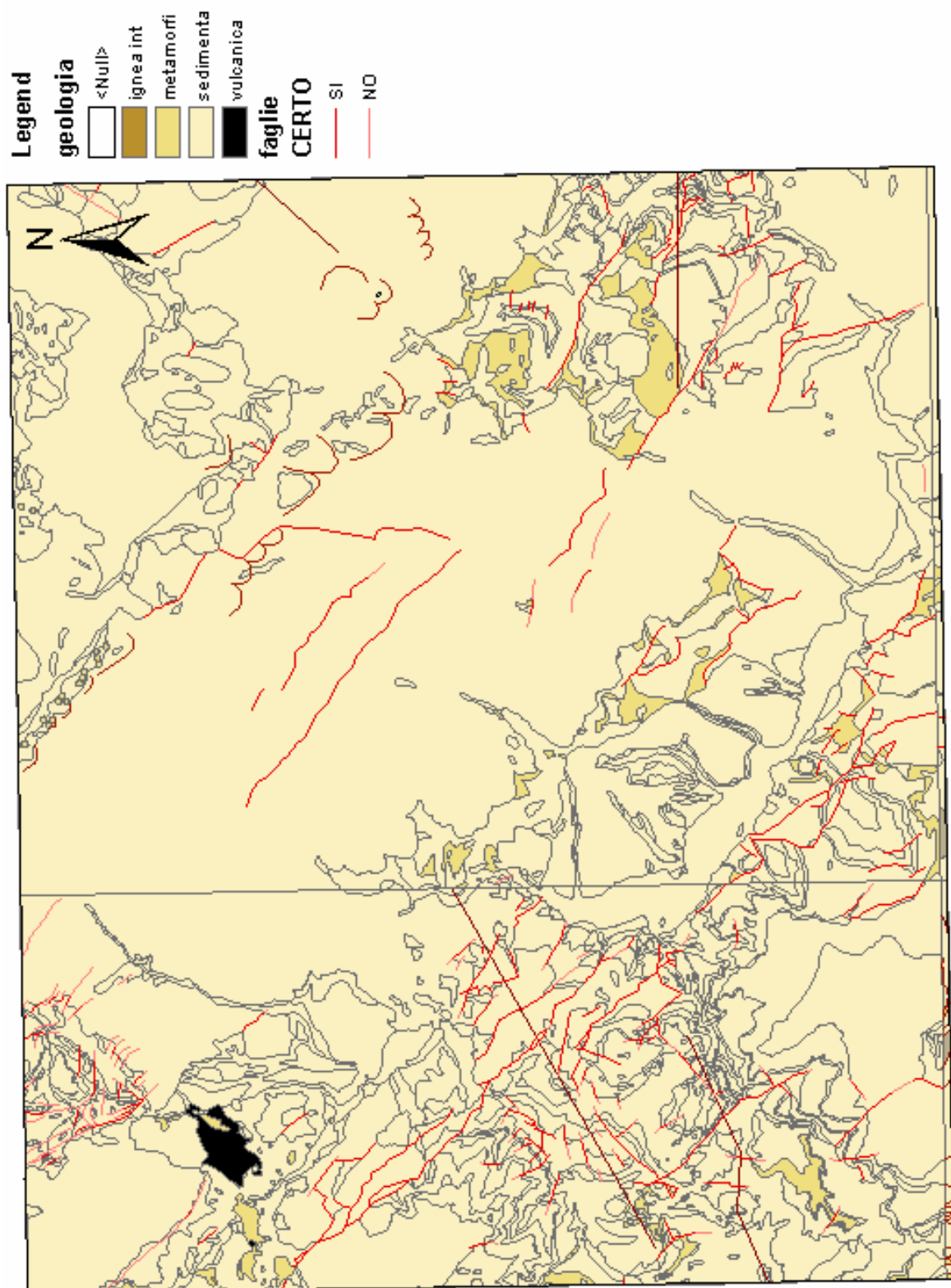


Figura 6.9: La creazione dello strato informativo “Geologia 1:100.000”.: visualizzazione in funzione del tipo di roccia (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

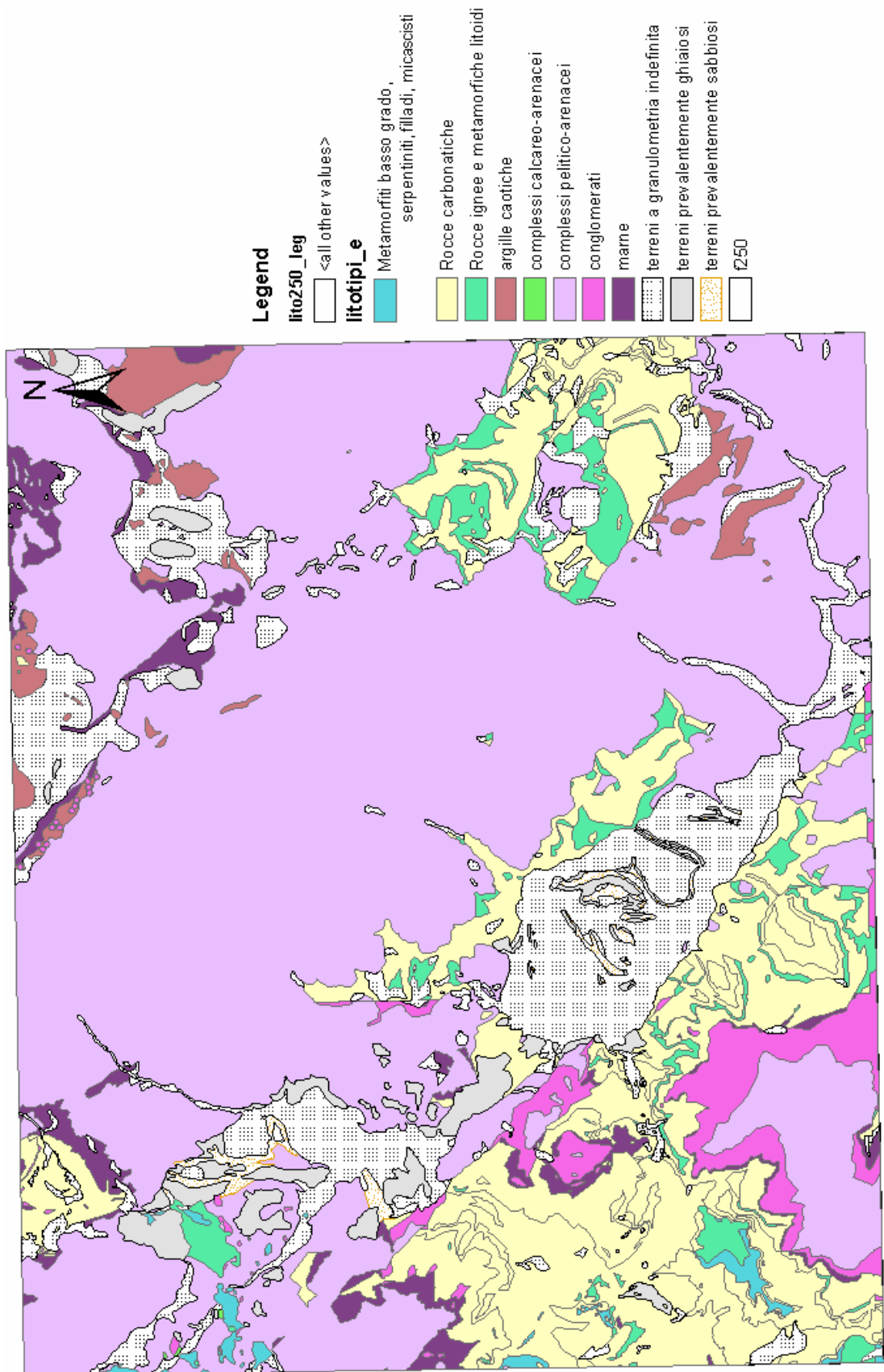


Figura 6.10: Lo strato informativo “Litologia 1:100.000 (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

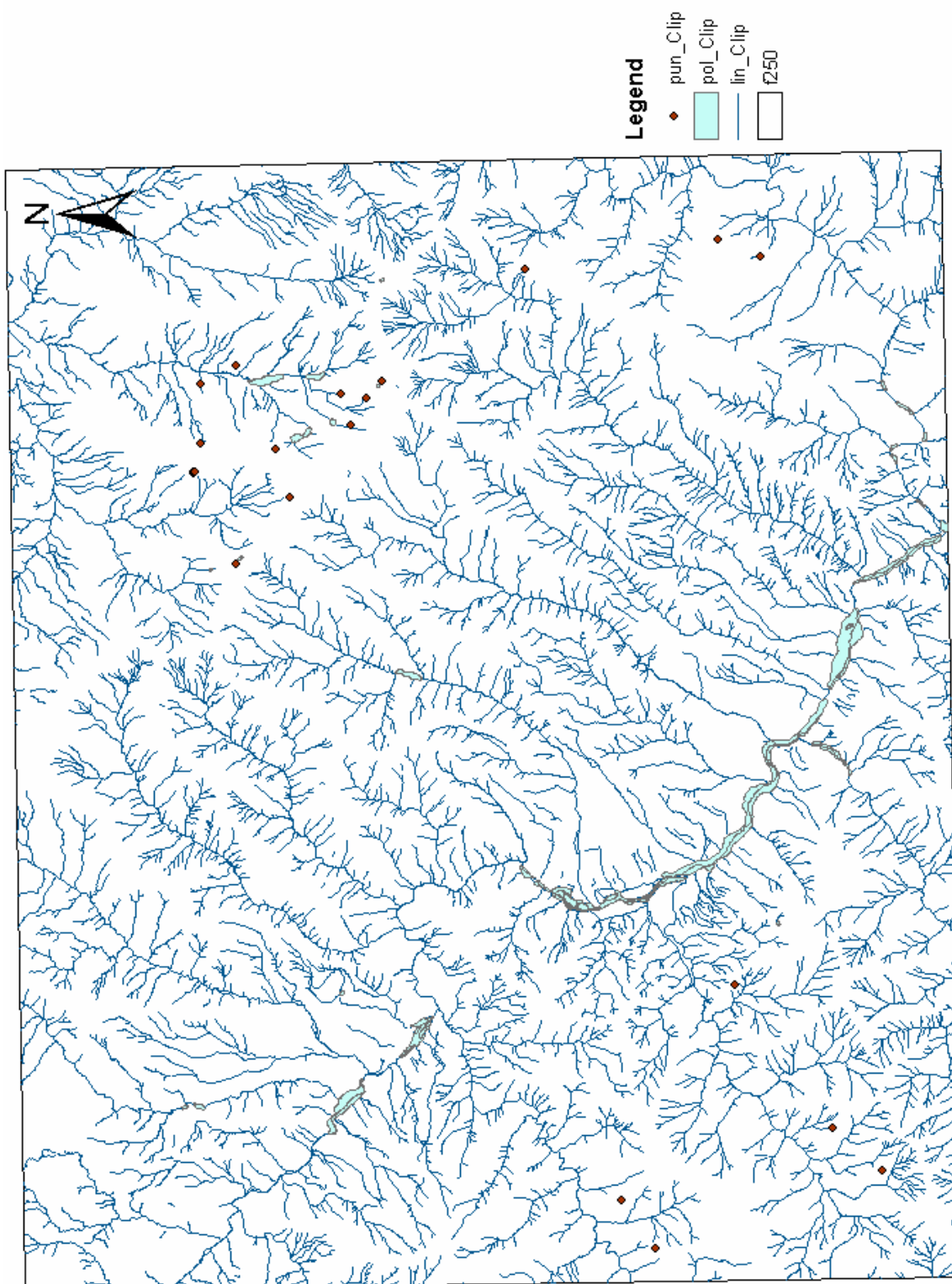


Figura 6.11: La creazione dello strato informativo “Idrografia” dall’unione degli strati informativi di Idrografia IGM relativi alle Province di Modena, Lucca e Pistoia, in scala 1:25.000 (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

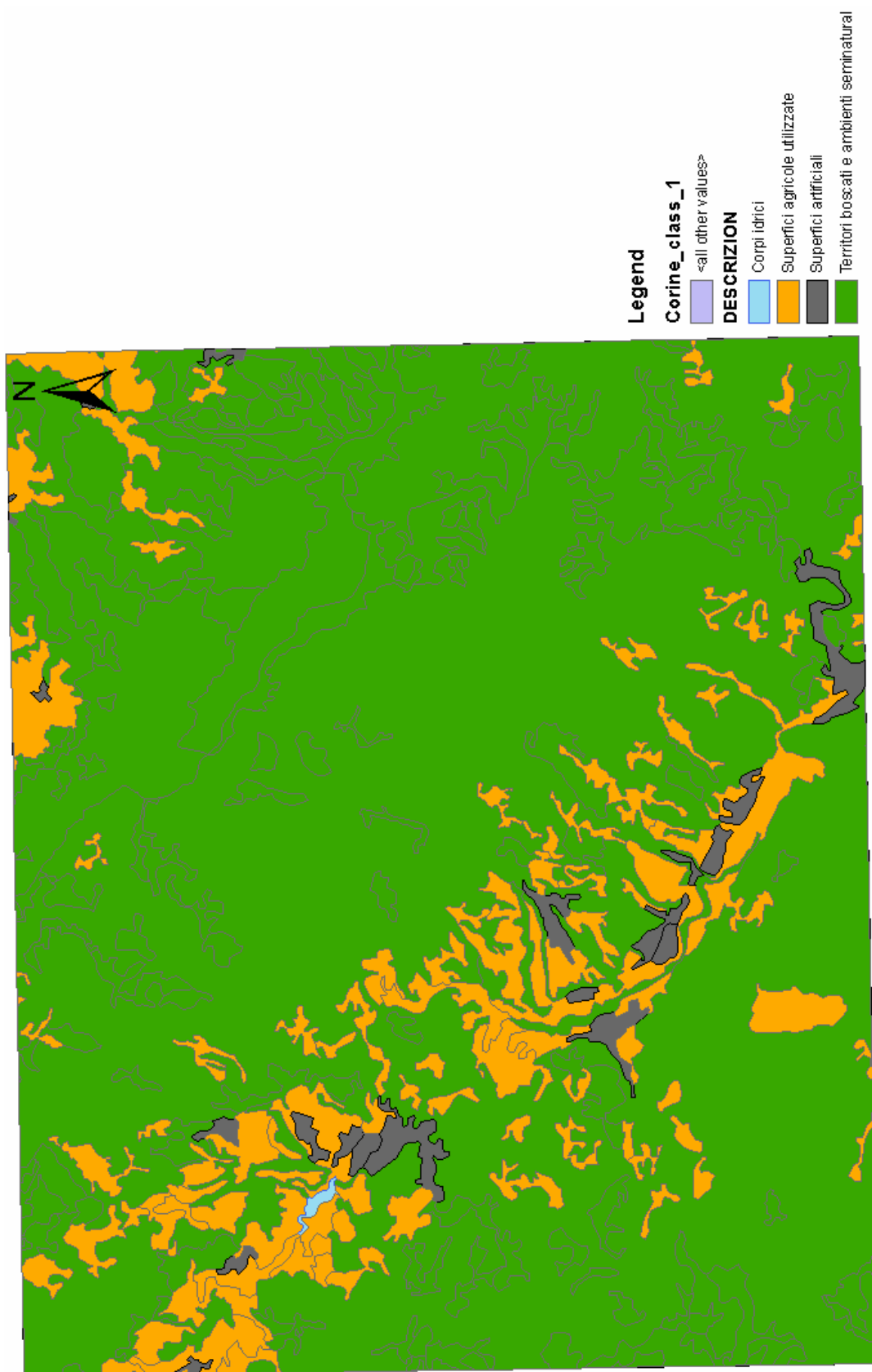


Figura 6.12: Carta di Uso del suolo con visualizzazione al livello di dettaglio del codice_1, corrispondente all'area coperta dal Foglio 250 "Castelnuovo di Garfagnana (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

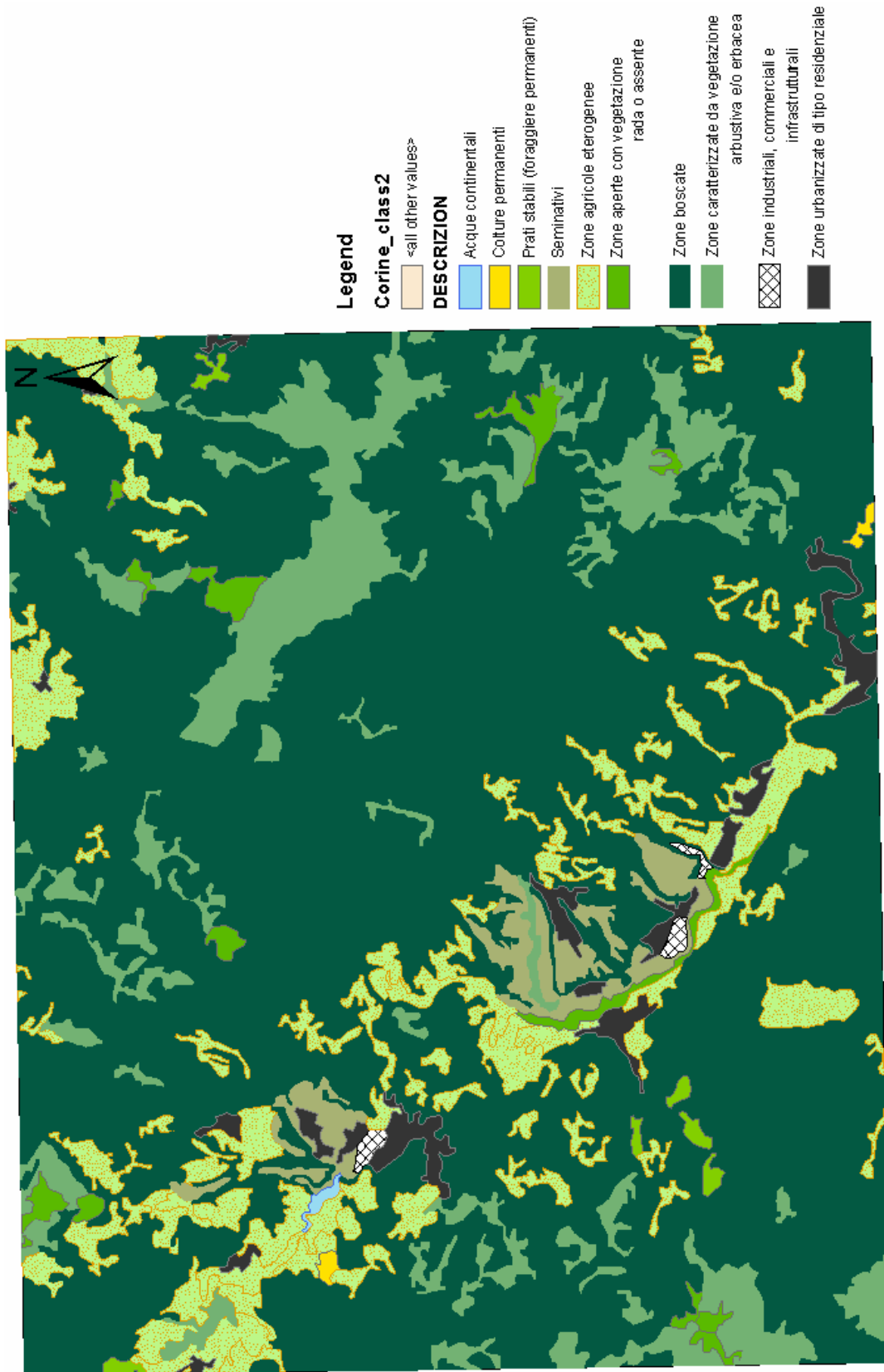


Figura 6.13: Carta di Uso del suolo con visualizzazione al livello di dettaglio del codice_2, corrispondente all'area coperta dal Foglio 250 "Castelnuovo di Garfagnana (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

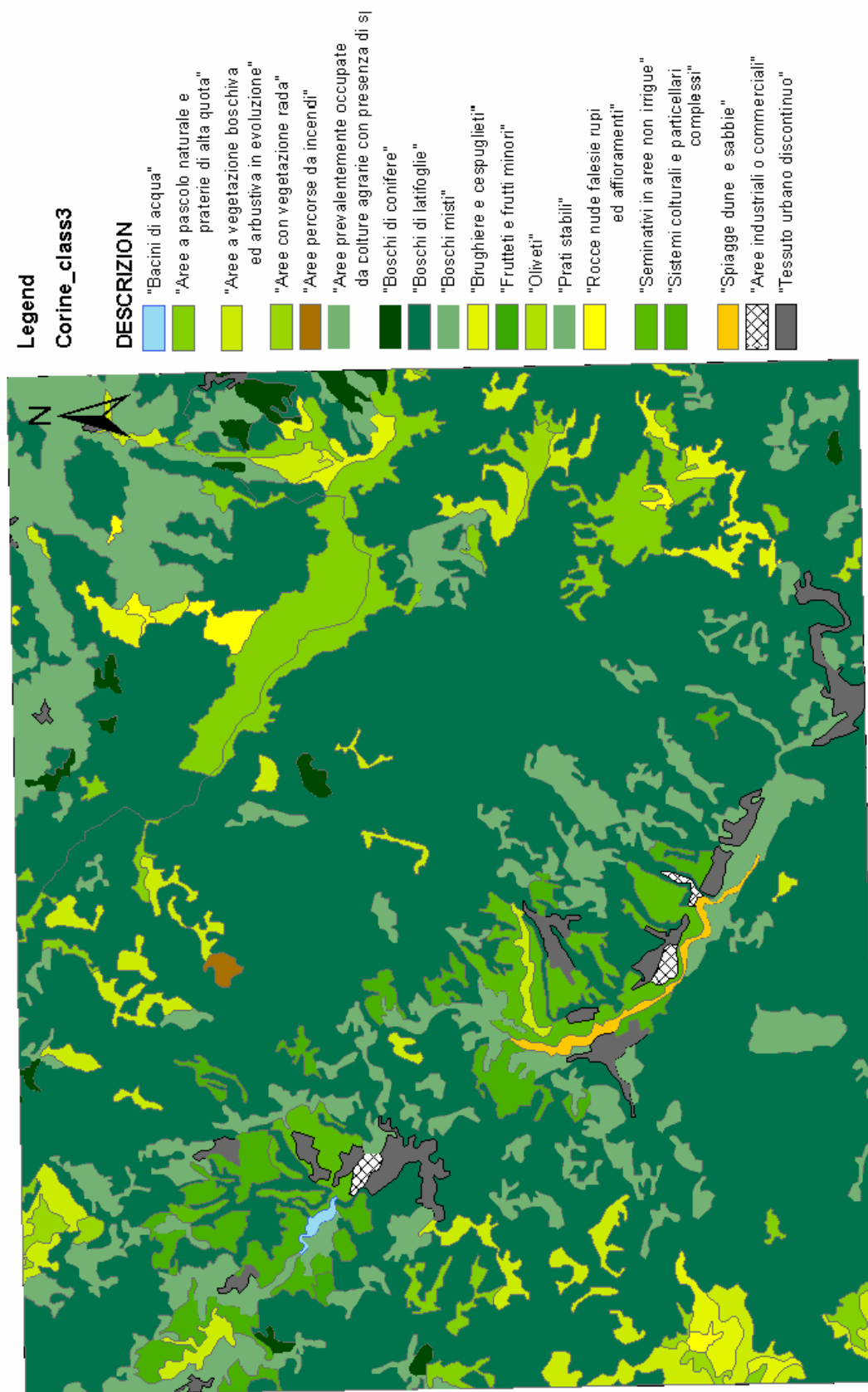


Figura 6.14: Carta di Uso del suolo con visualizzazione al livello di dettaglio del codice_3, corrispondente all'area coperta dal Foglio 250 "Castelnuovo di Garfagnana (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

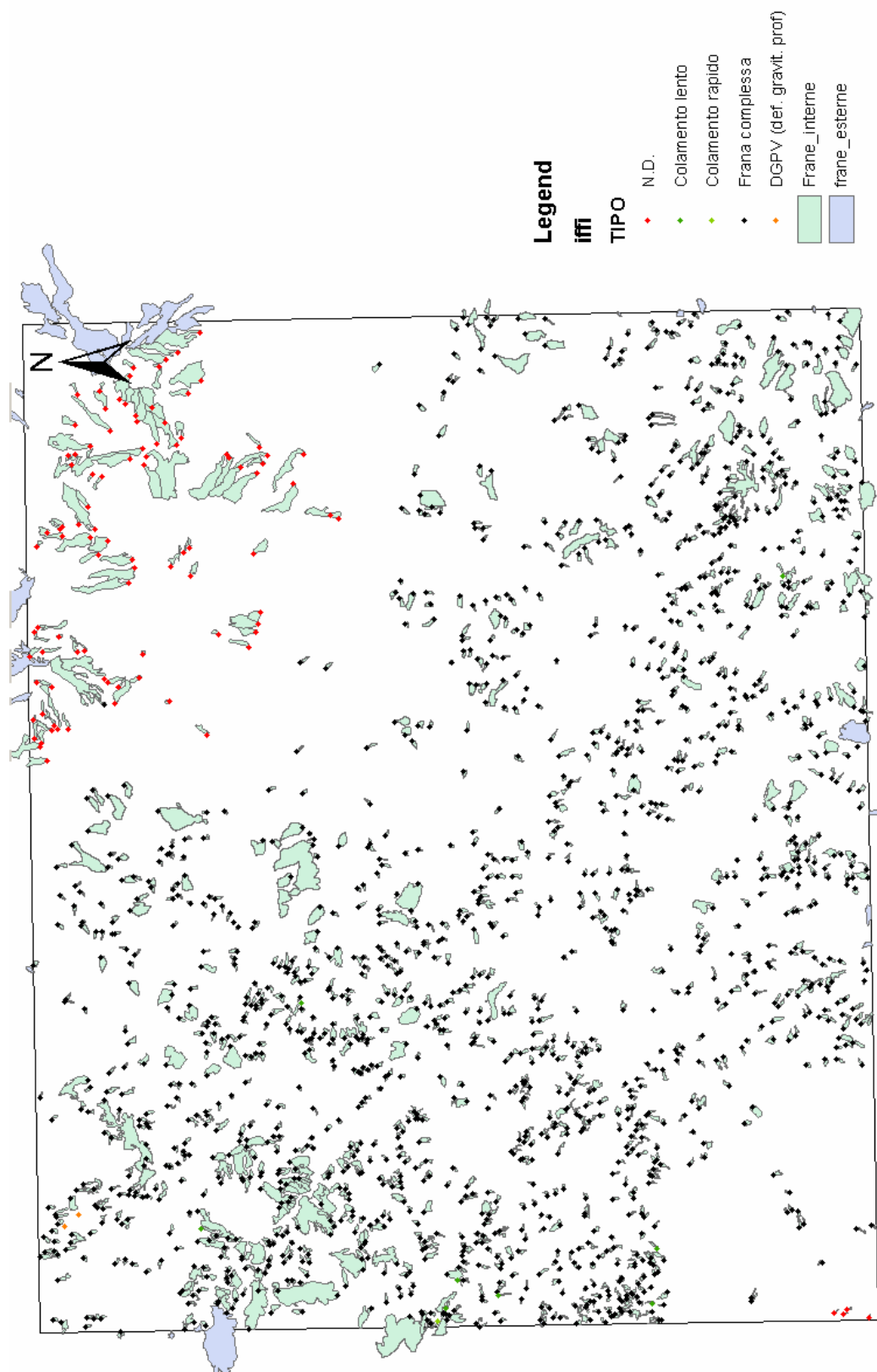


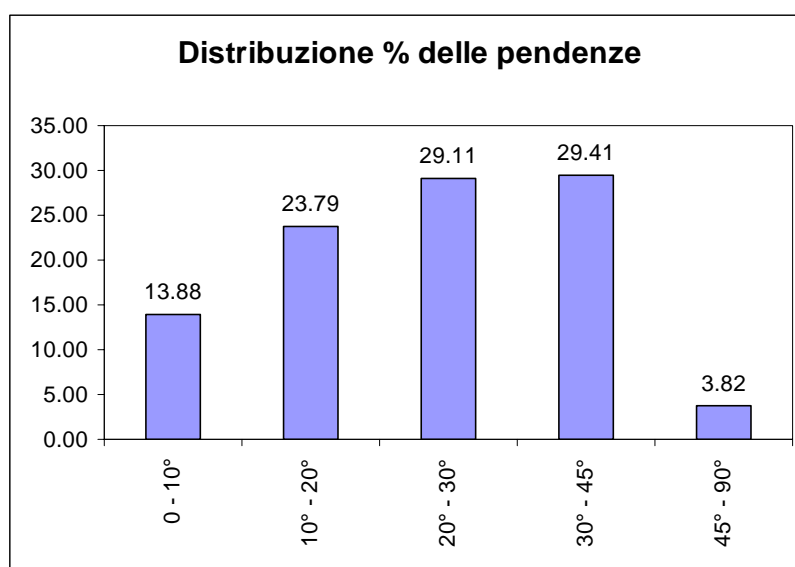
Figura 6.15: Il layer informativo che contiene le informazioni sulle frane dell'archivio IFFI, corrispondente all'area coperta dal Foglio 250 "Castelnuovo di Garfagnana (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

La *pendenza* (o *acclività*) e l'*esposizione* si possono ricavare a partire dal DEM, con operazioni di spatial analysis sulla superficie. Prima di fare studi statistici è opportuno riclassificare i file grid ottenuti.

Per quanto riguarda la pendenza, si sceglie di suddividere in 5 classi:

Infatti per pendenze superiori a 45° le frane sono quasi esclusivamente da crollo.

In figura 6.10 si riporta la distribuzione delle pendenze nell'area di studio, in forma di istogramma ed in forma tabellare. Si può osservare che non ci sono range di acclività particolarmente prevalenti: il 29,11% dell'area ha una pendenza compresa fra 20° e 30°, mentre il 29,41% ha pendenza compresa fra 30° e 45°.



ID_CLASSE	CLASSE DI ACCLIVITA'	Distribuzione delle pendenze %
1	0 - 10°	13.88
2	10° - 20°	23.79
3	20° - 30°	29.11
4	30° - 45°	29.41
5	45° - 90°	3.82

Figura 6.16: Rappresentazione della distribuzione delle pendenze nell'area di studio, in forma di istogramma ed in forma tabellare.

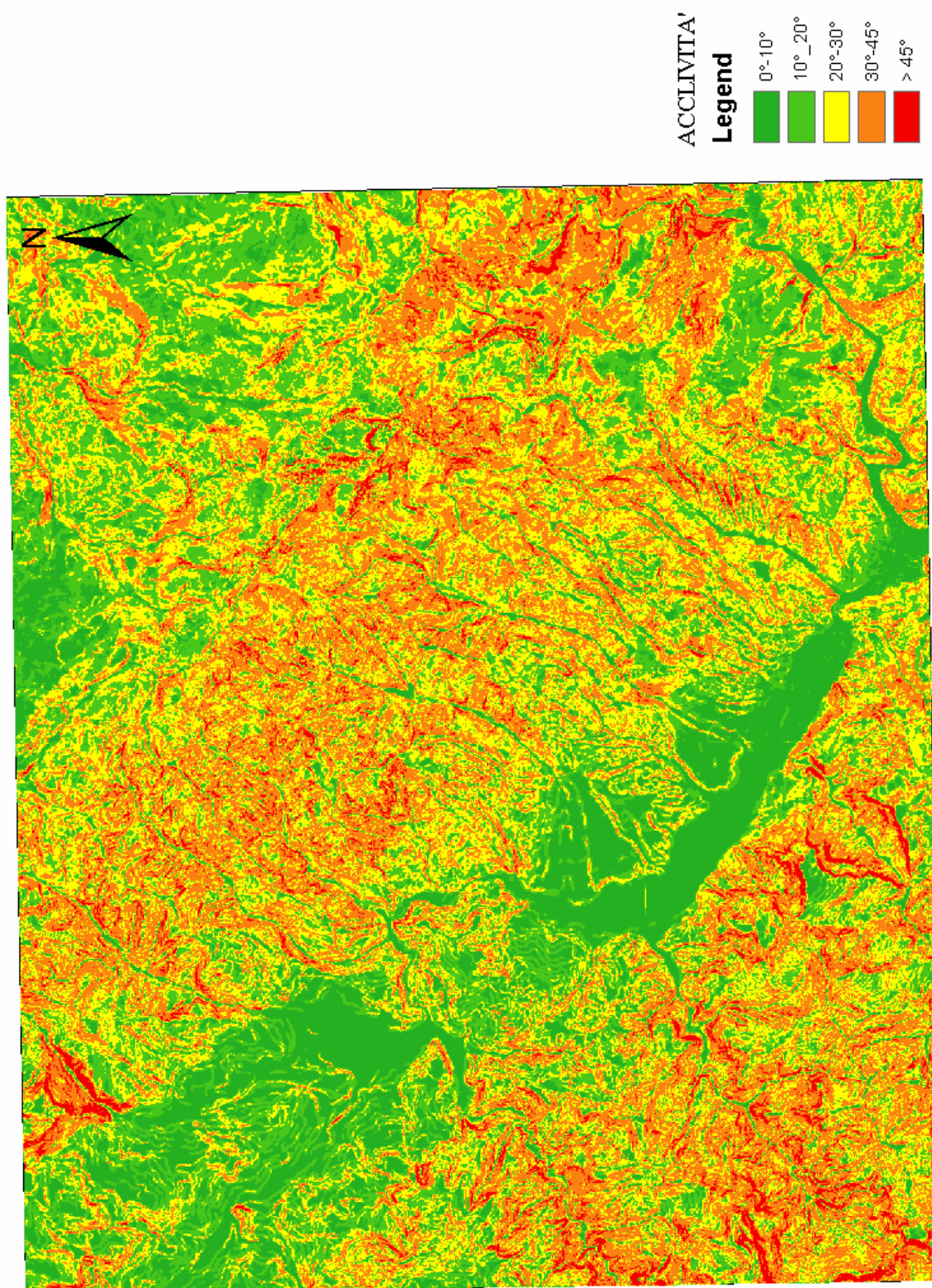
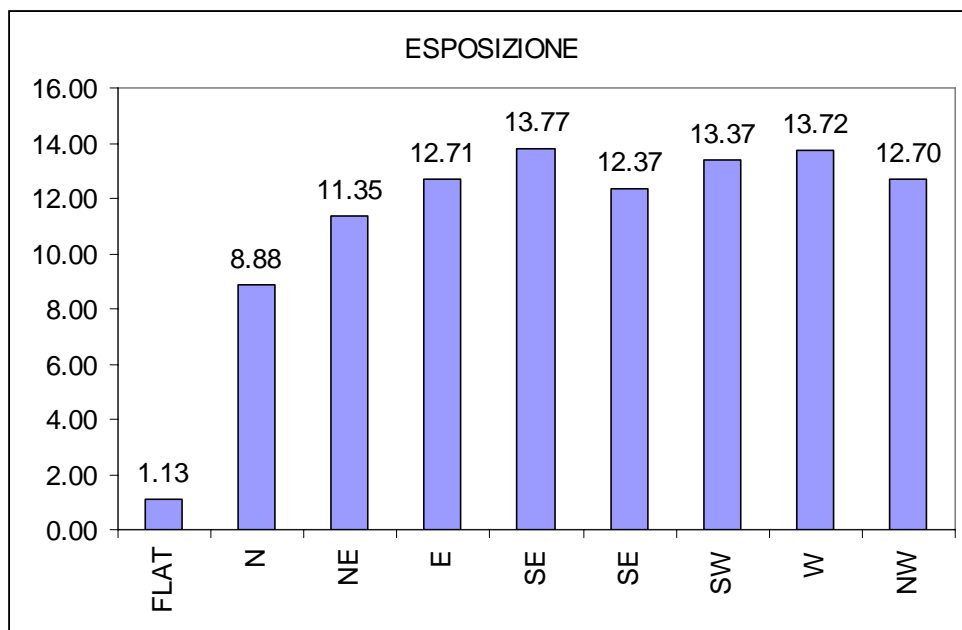


Figura 6.17: Il layer informativo che rappresenta le classi di acclività in cui è stata suddivisa l'area coperta dal Foglio 250 "Castelnuovo di Garfagnana" (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

Per quanto riguarda l'*esposizione* si sceglie di suddividere in 9 classi in funzione dei punti cardinali e delle direzioni intermedie.

In figura 6.11 si riporta la distribuzione delle esposizioni in funzione delle direzioni della “rosa dei venti”. Le esposizioni leggermente prevalenti risultano in direzione SE, con il 13,77%, W, con il 13,72% e SW, con il 13,32%.



ID_CLASSE	ESPOSIZIONE	Distribuzione dell'esposizione %
1	FLAT	1.13
2	N	8.88
3	NE	11.35
4	E	12.71
5	SE	13.77
6	SE	12.37
7	SW	13.37
8	W	13.72
9	NW	12.70
10	N	4.64

Figura 6.18: Rappresentazione della distribuzione delle esposizioni nell'area di studio, in forma di istogramma ed in forma tabellare.

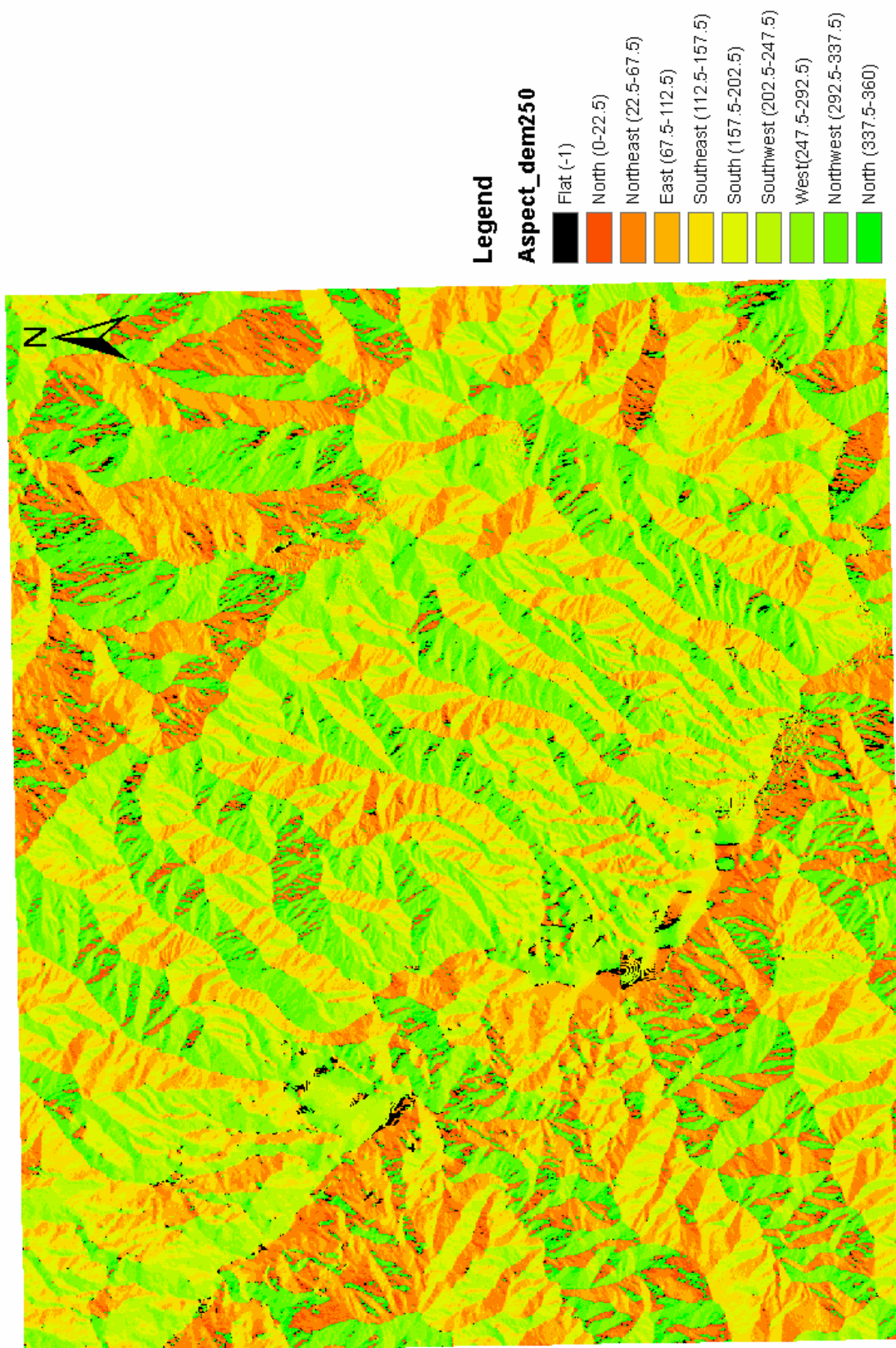


Figura 6.19: Il layer informativo che rappresenta l'esposizione relativamente all'area coperta dal Foglio 250 "Castelnuovo di Garfagnana" (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

6.5 DENSITÀ DI DRENAGGIO

Sarkar e Kanungo (2005) suggeriscono di calcolare la densità di drenaggio per passi successivi, costruendo una griglia con maglie di lato 1km, utilizzando uno script: “Fishnet.ddl”: si ottiene un file vettoriale: “griglia.shp”.

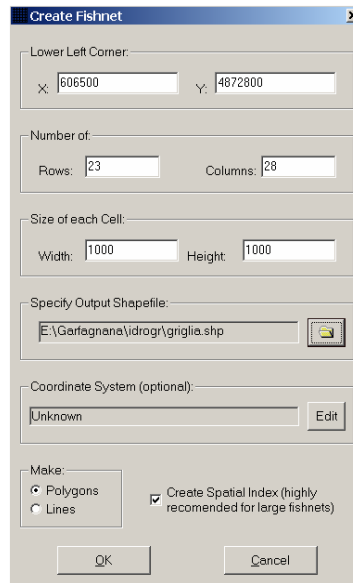


Figura 6.20: La schermata della funzionalità aggiuntiva inserita mediante lo script “Fishmet.ddl”.

- 1) Si interseca il file vettoriale che contiene le aste fluviali, “lin.shp”, col file vettoriale “griglia.shp” appena costruito. Si ottiene un nuovo file vettoriale, “Int_idro_grd.shp”.
- 2) Per ottenere la lunghezza delle aste fluviali contenute in ciascuna maglia quadrata di lato 1km, si fa un summarize su “Int_idro_grd.shp” sul campo Col-Row, richiedendo la somma delle Lunghezze. Si ottiene una Tabella dbf: “Lungh_aste_kmq.dbf”.
- 3) Si fa un Join fra “griglia.shp” e “Lungh_aste_kmq.dbf” sul campo Col-Row e si esporta il set di dati così ottenuto in un nuovo file vettoriale: “grid_length.shp”.
- 4) Si tematizza sulla base del campo Drain_Dens, dividendo in tre classi.

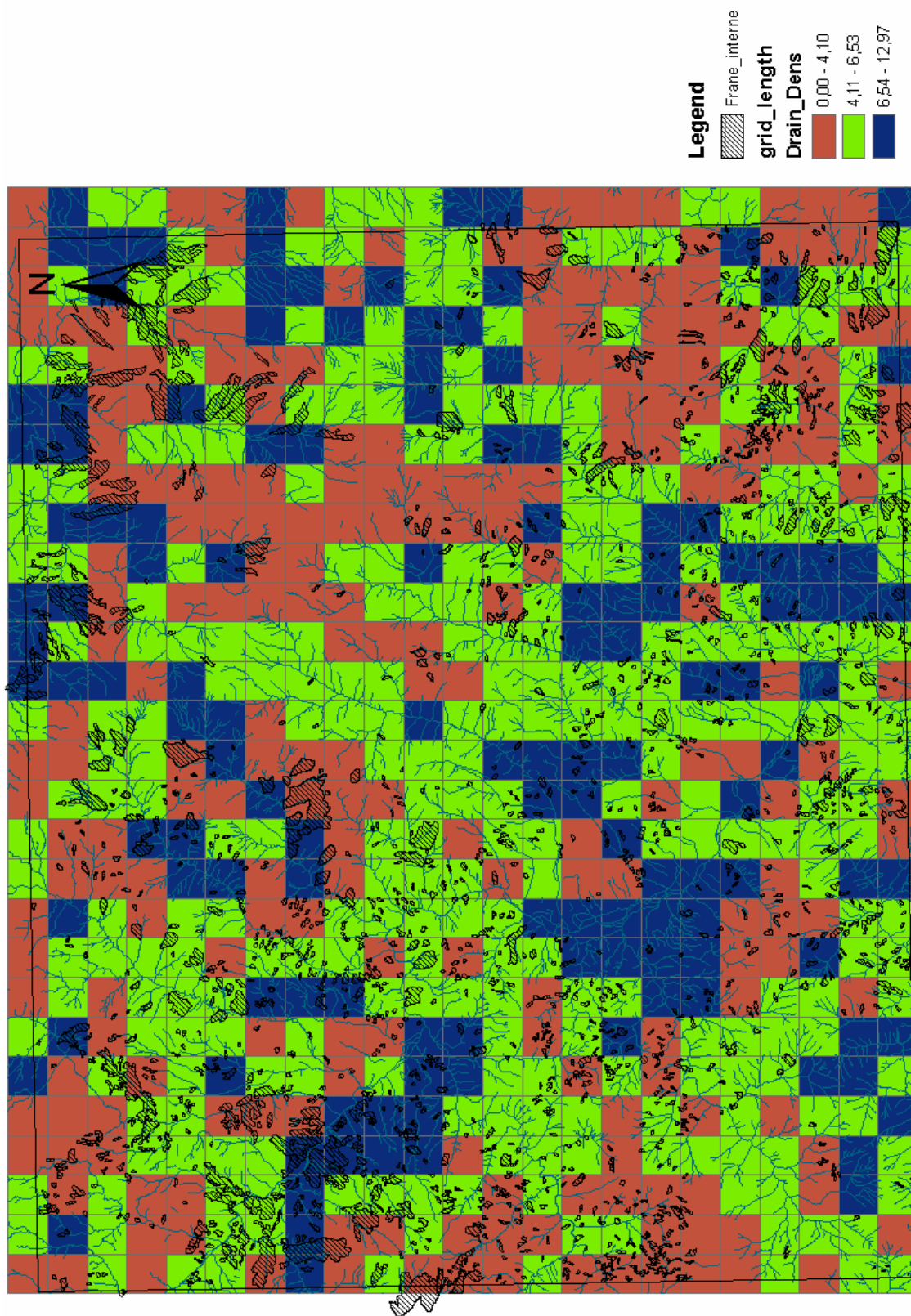


Figura 6.21: Mappa delle unità di densità di drenaggio a confronto con i poligoni delle frane IFFI (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

6.6 LA GEOREFERENZIAZIONE

Nella presente applicazione è stato necessario definire la proiezione per il tematismo “uso del suolo”, mediante la funzione:

Si è scelto di operare secondo la proiezione UTM con il sistema di coordinate ED 1950 UTM Zone 32N.



7 ELABORAZIONI STATISTICHE

Per questo tipo di operazioni è conveniente operare in formato raster, in quanto con esso si possono svolgere facilmente sovrapposizioni di strati informativi e riclassificazioni, fino ad ottenere delle Unità a Condizioni Uniche rispetto ai tematismi che si stanno analizzando.

7.1 RELAZIONE FRA USO DEL SUOLO E FRANOSITÀ

Per valutare quanta parte di ciascuna classe di uso del suolo Corine è in frana si calcola la densità areale di frana, dividendo il numero di *pixel* “in frana” per il numero totale di *pixel* che definiscono la distribuzione geografica della classe della variabile in questione:

$$D_{area} = 1000 \cdot \frac{N_{pix}(FV_{ij})}{N_{pix}(V_{ij})} \quad (7.1)$$

in cui:

D_{area} = densità areale in ‰

$N_{pix}(F V_{ij})$ = n° di *pixel* in frana nell’ambito della j-esima classe V della i-esima variabile indipendente;

$N_{pix}(V_{ij})$ = n° di *pixel* “componenti” la j-esima classe V della i-esima variabile indipendente.

Per il tipo di applicazione che si intende svolgere non ci interessa valutare quante frane ricadono in ciascuna unità di territorio individuata, quanto piuttosto quanta parte dell’area è interessata da movimenti di versante. Pertanto si calcoleranno solo densità areali di frana.

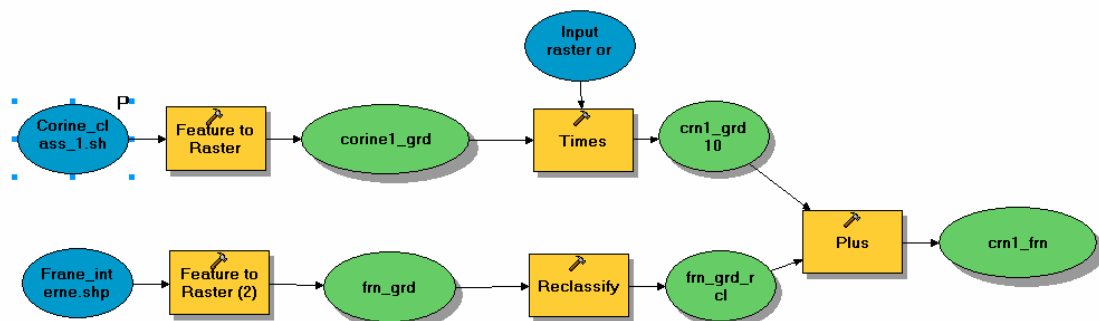
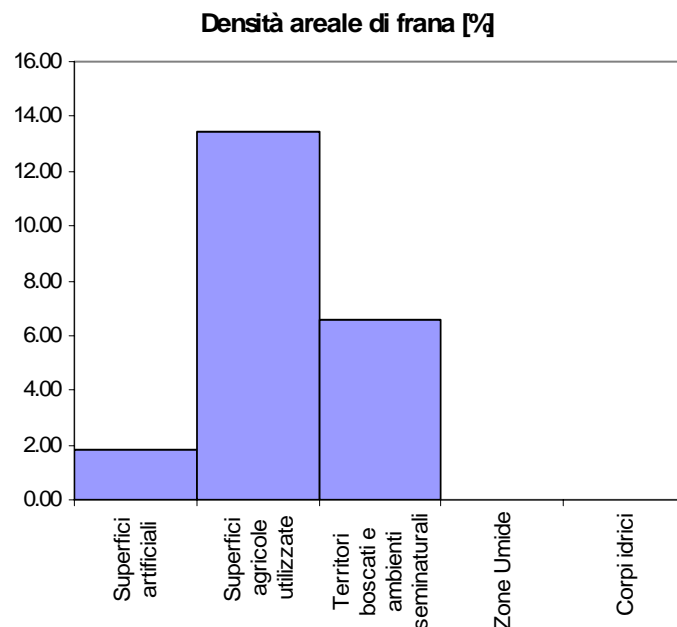


Figura 7.1: Il modello per l’identificazione dei pixel in frana all’interno di ciascuna classe di uso del suolo.

Per determinare quanti pixel sono in frana per ciascuna classe di uso del suolo si crea un modello con il Model builder di ArcToolbox (Figura 7.1) che trasforma in file raster sia lo shape che contiene l'uso del suolo, sia lo shape che contiene i poligoni che rappresentano le aree in frana, e poi li sovrappone con un'operazione di Map Algebra.

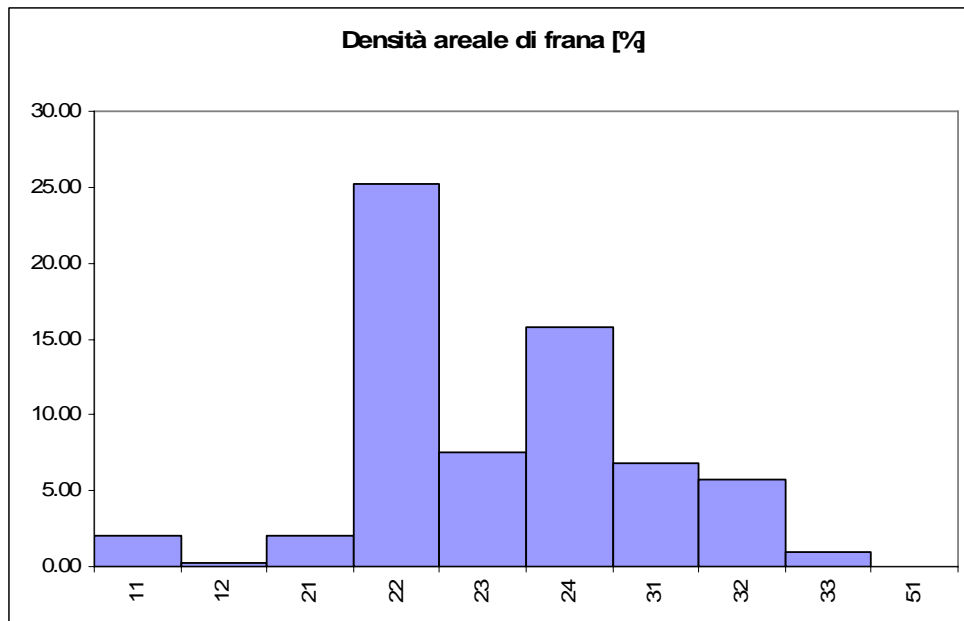
Nel grid risultato è possibile identificare attraverso la cifra finale del codice se ciascun pixel è in frana (codice 1) o non in frana (codice 0). Lo stesso modello può poi essere applicato anche per il livello 2 e per il livello 3 di Corine.

I risultati delle elaborazioni sono riportati sia in forma tabellare che in forma di istogramma nelle seguenti .



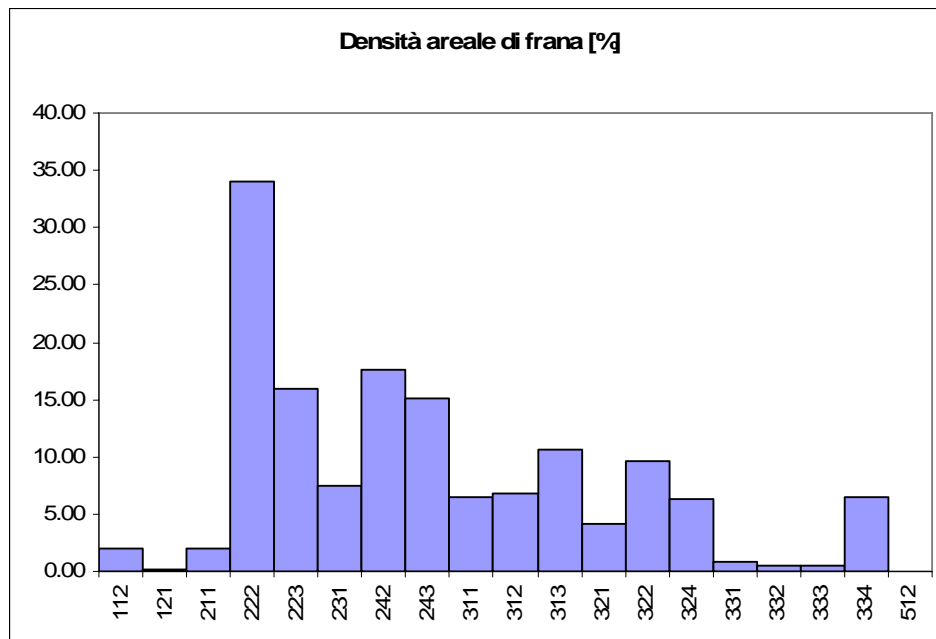
Classe di uso del suolo	$N_{pix}(V_{ij})$	$N_{pix}(F V_{ij})$	D_{area}
1. Superfici artificiali	30791	557	18.09
2. Superfici agricole utilizzate	188343	25272	134.18
3. Territori boscati e ambienti seminaturali	1262058	83046	65.80
4. Zone Umide	0	0	0
5. Corpi idrici	992	0	0

Figura 7.2: Calcolo della densità areale di frana nelle classi di uso del suolo Corine Land Cover al livello 1.



	Classe di uso del suolo	$N_{pix}(V_{ij})$	$N_{pix}(F V_{ij})$	D_{area}
11	Zone urbanizzate di tipo residenziale	27756	550	1,98
12	Zone industriali, commerciali e infrastrutturali	3035	7	0,23
21	Seminativi	30164	604	2,00
22	Colture permanenti	1644	414	25,18
23	Prati stabili (foraggiere permanenti)	4926	369	7,49
24	Zone agricole eterogenee	151609	23885	15,75
31	Zone boscate	1086924	73960	6,80
32	Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	154992	8884	5,73
33	Zone aperte con vegetazione rada o assente	20142	202	1,00
51	Acque continentali	992	0	0,00

Figura 7.3: Calcolo della densità areale di frana nelle classi di uso del suolo Corine Land Cover al livello 2.



	Classe di uso del suolo	$N_{pix}(V_{ij})$	$N_{pix}(F V_{ij})$	D_{area}
112	"Tessuto urbano discontinuo"	27756	550	1,98
121	"Aree industriali o commerciali"	3035	7	0,23
211	"Seminativi in aree non irrigue"	30164	604	2,00
222	"Frutteti e frutti minori"	841	286	34,01
223	"Oliveti"	803	128	15,94
231	"Prati stabili"	4926	369	7,49
242	"Sistemi colturali e particellari complessi"	43510	7634	17,55
243	"Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali"	108099	16251	15,03
311	"Boschi di latifoglie"	981452	63288	6,45
312	"Boschi di conifere"	12918	886	6,86
313	"Boschi misti"	92554	9786	10,57
321	"Aree a pascolo naturale e praterie di alta quota"	74185	3040	4,10
322	"Brughiere e cespuglieti"	21132	2044	9,67
324	"Aree a vegetazione boschiva ed arbustiva in evoluzione"	59675	3800	6,37
331	"Spiagge dune e sabbie"	4388	34	0,77
332	"Rocce nude falesie rupi ed affioramenti"	6020	33	0,55
333	"Aree con vegetazione rada"	8367	47	0,56
334	"Aree percorse da incendi"	1367	88	6,44
512	"Bacini di acqua"	956	0	0,00

Figura 7.4: Calcolo della densità areale di frana nelle classi di uso del suolo Corine Land Cover al livello 3.

Si può osservare che la maggior parte dell'area in frana ricade in superfici agricole utilizzate, in particolare in colture permanenti di frutteti e frutti minori.

7.2 RELAZIONE FRA LITOLOGIA-PENDENZA USO DEL SUOLO E FRANOSITÀ

7.2.1 CREAZIONE DELLA UCU3 e RELAZIONE FRA UCU3 E FRANOSITÀ

Nella seconda elaborazione si intende individuare delle Unità a Condizioni Uniche in termini di litologia, pendenza ed uso del suolo (Corine).

Anche questa volta si è fatto uso del “Model builder” di ArcToolbox, costruendo un modello parametrico di calcolo che consente di sovrapporre i temi: litologia, pendenza e uso suolo (Corine Land Cover)

Per la sovrapposizione dei temi si stabilisce la seguente codifica:

$$\text{Corine} * 10000 + \text{Pendenza} * 100 + \text{Litologia}.$$

In questo modo si otterrà un codice XXYYZZ in cui le prime due cifre identificano la classe di uso del suolo, le due cifre centrali identificano la classe di pendenza e le ultime due la classe litologica di appartenenza.

La sovrapposizione si fa mediante il Model Builder di ArcToolbox, con il modello in Figura 7.5, che fa convertire in raster tutti i file shape di input e poi li sovrappone con operazioni di map Algebra.

Per valutare la distribuzione delle aree in frana rispetto alle UCU appena individuate si fa un'operazione analoga a quella fatta per individuare la distribuzione delle frane rispetto al solo “uso del suolo”, ancora col Model Builder.

Nel grid ucu_frn, che si ottiene come output, è possibile identificare attraverso la cifra finale del codice se ciascun pixel è in frana (codice 1) o non in frana (codice 0).

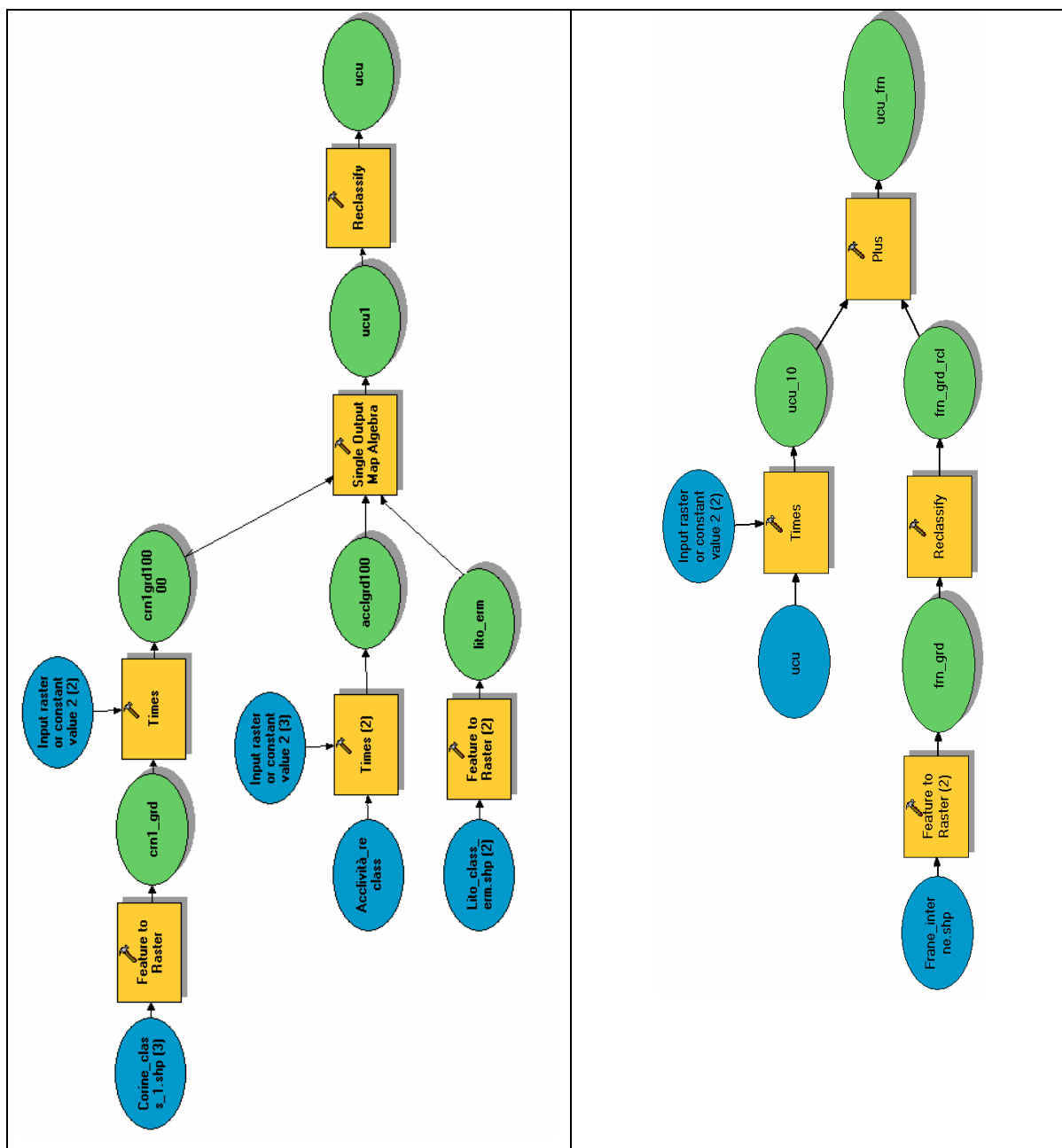


Figura 7.5: Il modello utilizzato per l'individuazione delle UCU3, nate dalla sovrapposizione fra i temi "Litologia", "Pendenza" e "Uso del suolo" ed il modello utilizzato per l'individuazione delle aree in frana all'interno di ciascuna delle UCU3.

A questo punto è possibile svolgere alcune operazioni statistiche.

Dal calcolo della densità areale di frana si osserva che in corrispondenza di alcune combinazioni si hanno altissime percentuali di area in frana, ma ciò è legato al fatto che alcune UCU risultano talmente piccole che risultano quasi del tutto in frana..

Tabella 7.1: Distribuzione areale delle frane in funzione delle UCU , nate dalla sovrapposizione fra i temi “Litologia”, “Pendenza” e “Uso del suolo”.

codice	$N_{pix}(V_{ij})$	$Numero(FV_{ij})$	$Area(V_{ij})$	D_{area}
20303	1460	1459	29220	99.93
10509	3897	3890	77960	99.82
20203	1454	1451	29100	99.79
20510	61	60	1240	98.36
30508	1665	1627	33320	97.72
30507	40	38	820	95.00
10401	261	244	5240	93.49
10506	8	7	180	87.50
10311	20	17	420	85.00
10405	34	28	700	82.35
20103	4	3	100	75.00
10404	15	6	320	40.00
10502	3	1	80	33.33
20205	4377	1306	87560	29.84
30103	55	14	1120	25.45
20105	1647	387	32960	23.50
20305	2056	480	41140	23.35
20110	1571	361	31440	22.98
20202	20458	4648	409180	22.72
20102	15622	3522	312460	22.55
30403	14	3	300	21.43
20210	3702	792	74060	21.39
30205	10771	2300	215440	21.35
30110	3925	829	78520	21.12
10106	15	3	320	20.00
30210	11622	2319	232460	19.95
30105	3302	615	66060	18.63
30303	33	6	680	18.18
20208	5979	1074	119600	17.96
20311	604	106	12100	17.55
20306	1499	239	30000	15.94
10301	13	2	280	15.38
20411	440	67	8820	15.23
30208	10528	1568	210580	14.89
20111	914	133	18300	14.55
20406	774	111	15500	14.34
10111	91	13	1840	14.29
10410	7	1	160	14.29
20206	2077	293	41560	14.11
20209	16375	2292	327520	14.00
20308	1501	207	30040	13.79
30308	4893	672	97880	13.73
20302	10824	1459	216500	13.48
30207	1915	258	38320	13.47
30209	32589	4351	651800	13.35
20101	4470	580	89420	12.98
20405	607	77	12160	12.69
20309	4422	560	88460	12.66

20409	876	110	17540	12.56
30305	9763	1222	195280	12.52
20106	1725	209	34520	12.12
30307	1193	144	23880	12.07
30310	5030	593	100620	11.79
30309	25556	2951	511140	11.55
10308	210	24	4220	11.43
30107	2258	256	45180	11.34
30108	7228	818	144580	11.32
20402	4600	507	92020	11.02
20310	778	84	15580	10.80
20201	9589	1024	191800	10.68
10206	48	5	980	10.42
20204	1618	167	32380	10.32
30407	462	47	9260	10.17
20211	803	81	16080	10.09
20108	7481	739	149640	9.88
10306	41	4	840	9.76
20301	8003	761	160080	9.51
20509	22	2	460	9.09
20304	1604	145	32100	9.04
20207	1038	92	20780	8.86
10302	685	60	13720	8.76
30202	162663	14126	3253280	8.68
30204	10303	886	206080	8.60
30304	14390	1161	287820	8.07
20502	174	14	3500	8.05
30106	2445	194	48920	7.93
30408	1586	125	31740	7.88
30409	16277	1239	325560	7.61
20401	4596	345	91940	7.51
30111	323	24	6480	7.43
30410	1069	79	21400	7.39
30509	1753	126	35080	7.19
30510	29	2	600	6.90
30206	7233	476	144680	6.58
20506	61	4	1240	6.56
30302	260039	17030	5200800	6.55
20408	220	14	4420	6.36
20511	64	4	1300	6.25
30102	45926	2867	918540	6.24
20404	369	23	7400	6.23
20107	1625	95	32520	5.85
30306	11828	667	236580	5.64
20504	18	1	380	5.56
30405	6535	362	130720	5.54
10402	258	14	5180	5.43
30201	32171	1731	643440	5.38
30406	12563	647	251280	5.15
20109	41298	2085	825980	5.05
30301	63689	3087	1273800	4.85
20307	213	10	4280	4.69

30404	12480	583	249620	4.67
10409	257	12	5160	4.67
30504	1686	77	33740	4.57
30402	261819	11686	5236400	4.46
10209	2803	125	56080	4.46
30203	70	3	1420	4.29
20104	940	40	18820	4.26
30104	2663	112	53280	4.21
30211	633	26	12680	4.11
10211	25	1	520	4.00
30109	25044	999	500900	3.99
20501	381	14	7640	3.67
30506	1394	51	27900	3.66
30401	107428	3869	2148580	3.60
30101	11911	425	238240	3.57
10406	29	1	600	3.45
30502	24717	851	494360	3.44
20410	88	3	1780	3.41
10202	1516	45	30340	2.97
10309	817	24	16360	2.94
10208	377	10	7560	2.65
10408	40	1	820	2.50
10201	47	1	960	2.13
30311	1376	28	27540	2.03
30501	25225	505	504520	2.00
10102	1302	22	26060	1.69
10310	60	1	1220	1.67
20407	61	1	1240	1.64
20505	62	1	1260	1.61
30505	472	5	9460	1.06
10108	296	3	5940	1.01
10109	20449	184	409000	0.90
30411	2245	18	44920	0.80
10210	243	1	4880	0.41
30511	435	1	8720	0.23
10101	133	0	2680	0.00
10104	130	0	2620	0.00
10105	200	0	4020	0.00
10107	62	0	1260	0.00
10110	79	0	1600	0.00
10204	45	0	920	0.00
10205	335	0	6720	0.00
10207	46	0	940	0.00
10304	9	0	200	0.00
10305	59	0	1200	0.00
10307	8	0	180	0.00
50000	992	0	19860	0.00

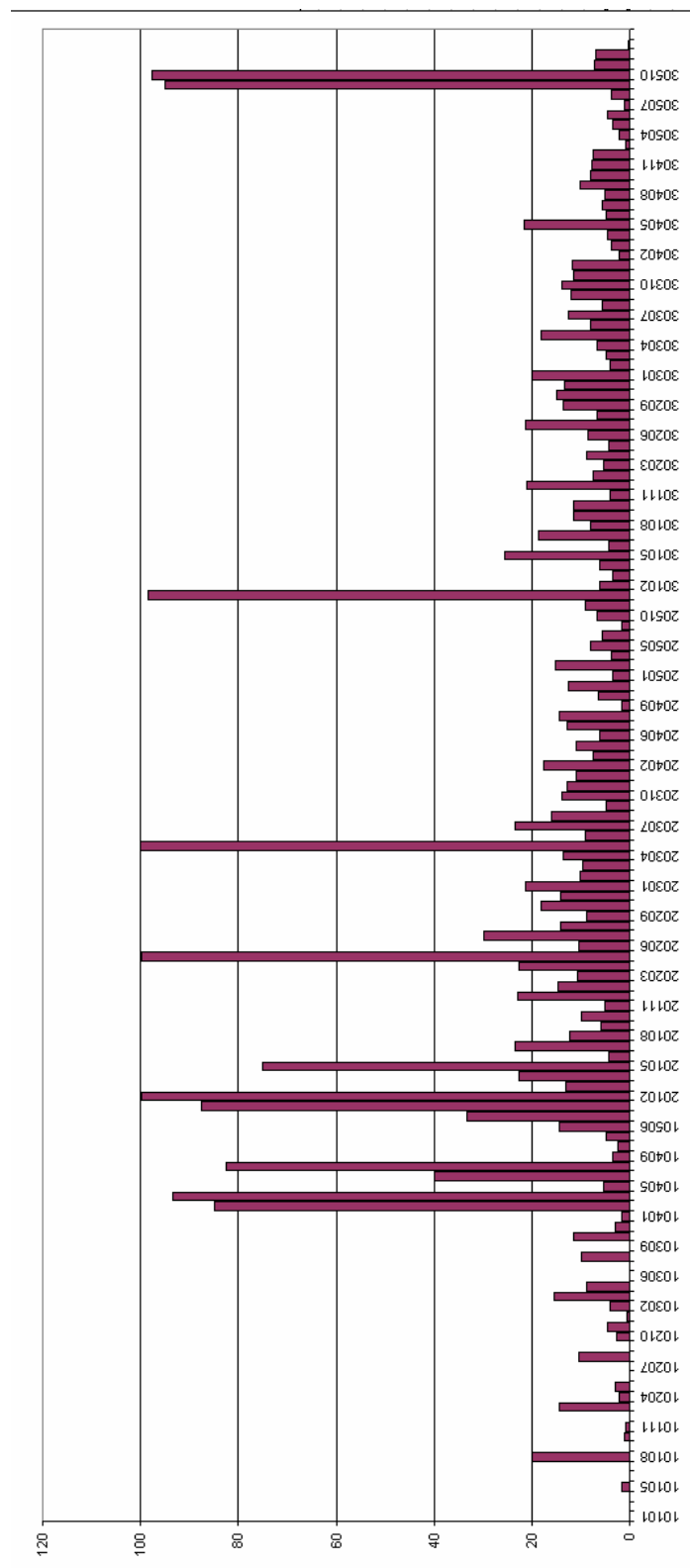


Figura 7.6: Istogramma della densità areale di frana.

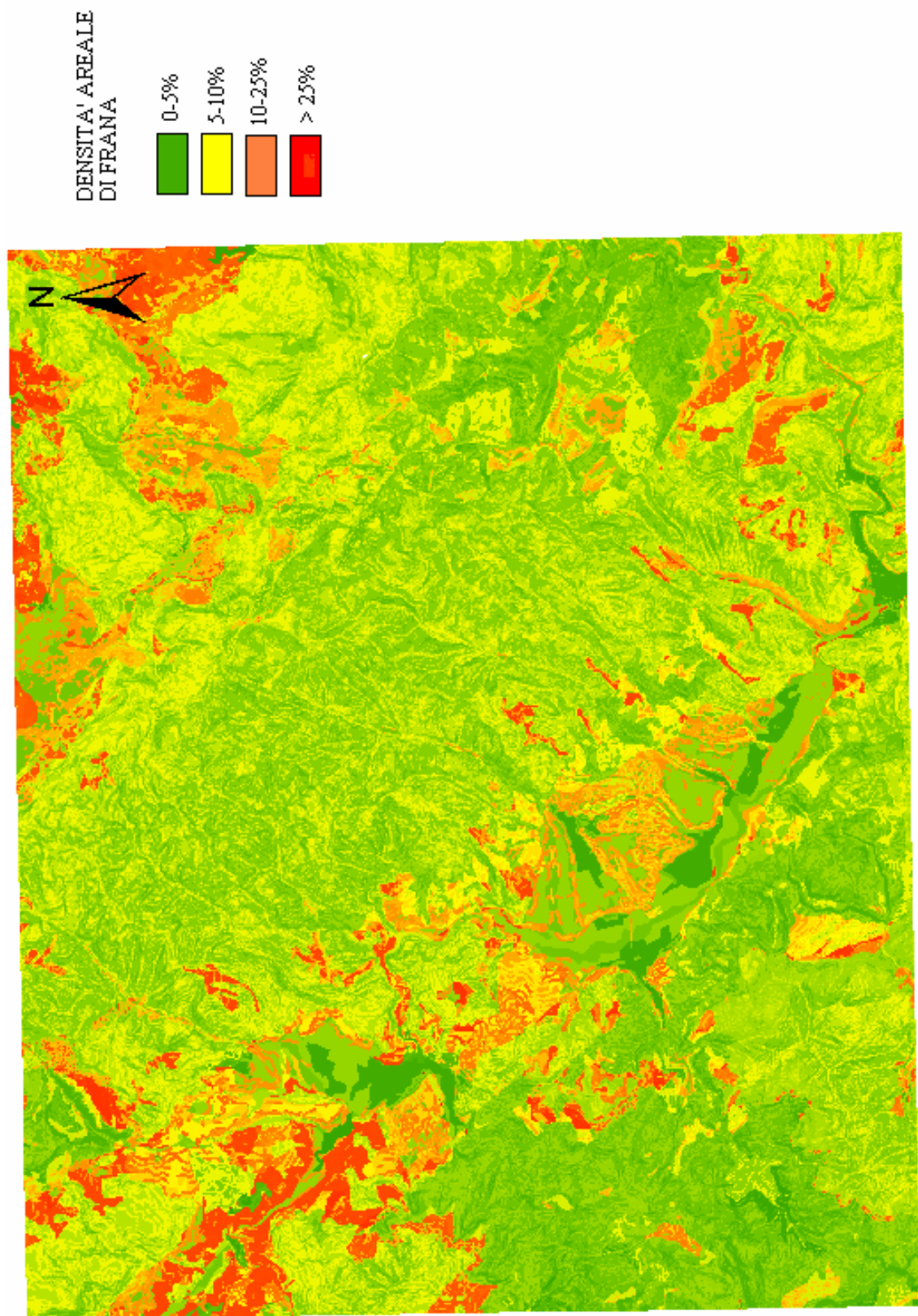


Figura 7.7: Carta della densità areale di frana (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

7.3 CALCOLO DEL TRMI (Topographic Relative Moisture Index)

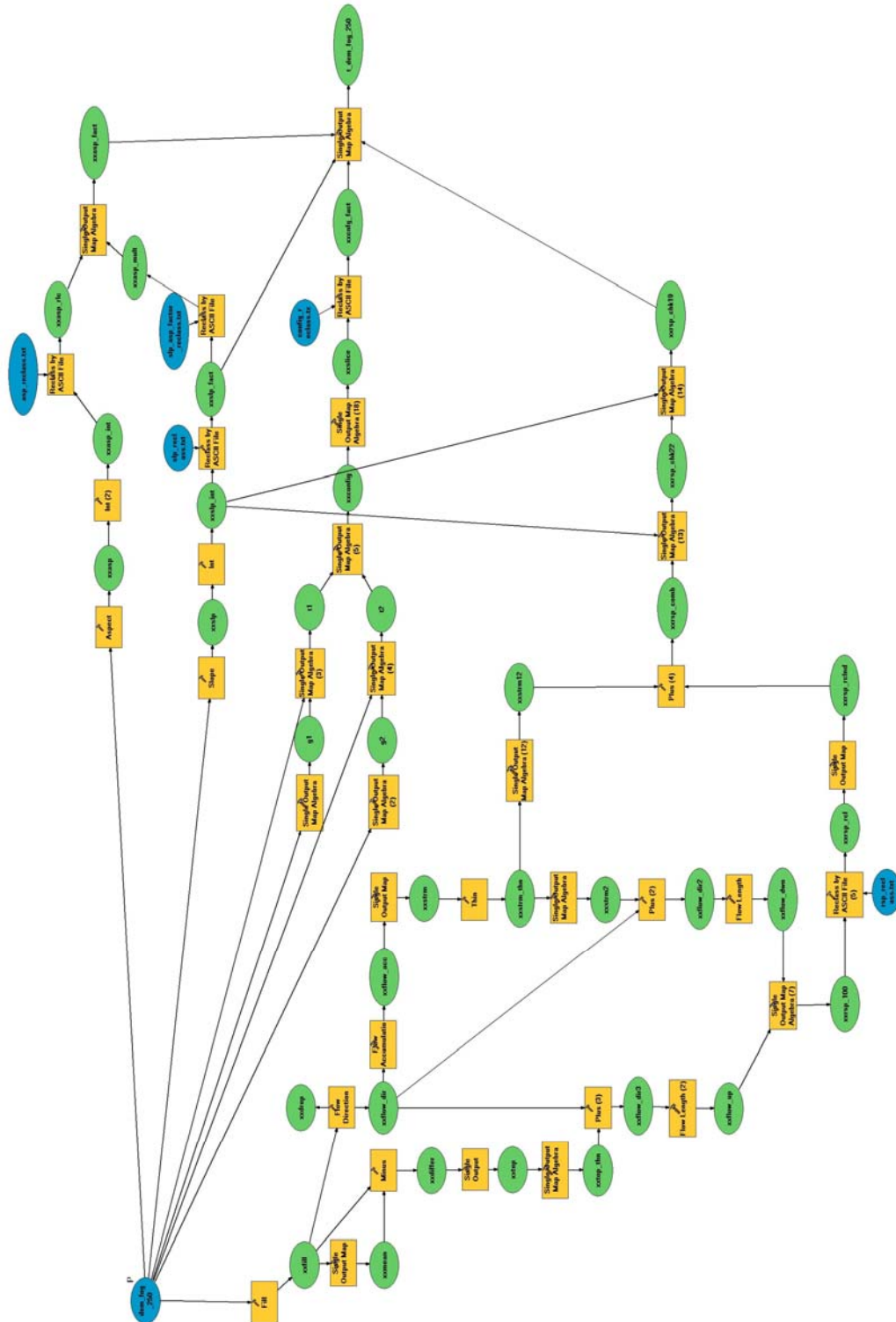


Figura 7.8: Visione globale dei primi 13 step per il calcolo del TRMI.

Nella terza elaborazione si vuole calcolare il TRMI (Topographic Relative Moisture Index) (Parker, 1982) per ciascun pixel dell'area di studio.

Per ottenerlo si fa uso di un codice che viene tradotto mediante il “Model builder” di ArcToolbox, costruendo un modello parametrico di calcolo attraverso Arc Catalog.

Il modello viene costruito per steps, che man mano vengono collegati l'uno all'altro, dando luogo ad una struttura molto complessa, che viene rappresentata in Figura 7.8 e Figura 7.9.

Nella Figura 7.24 si riporta la mappa del TRMI ottenuta con questa procedura.

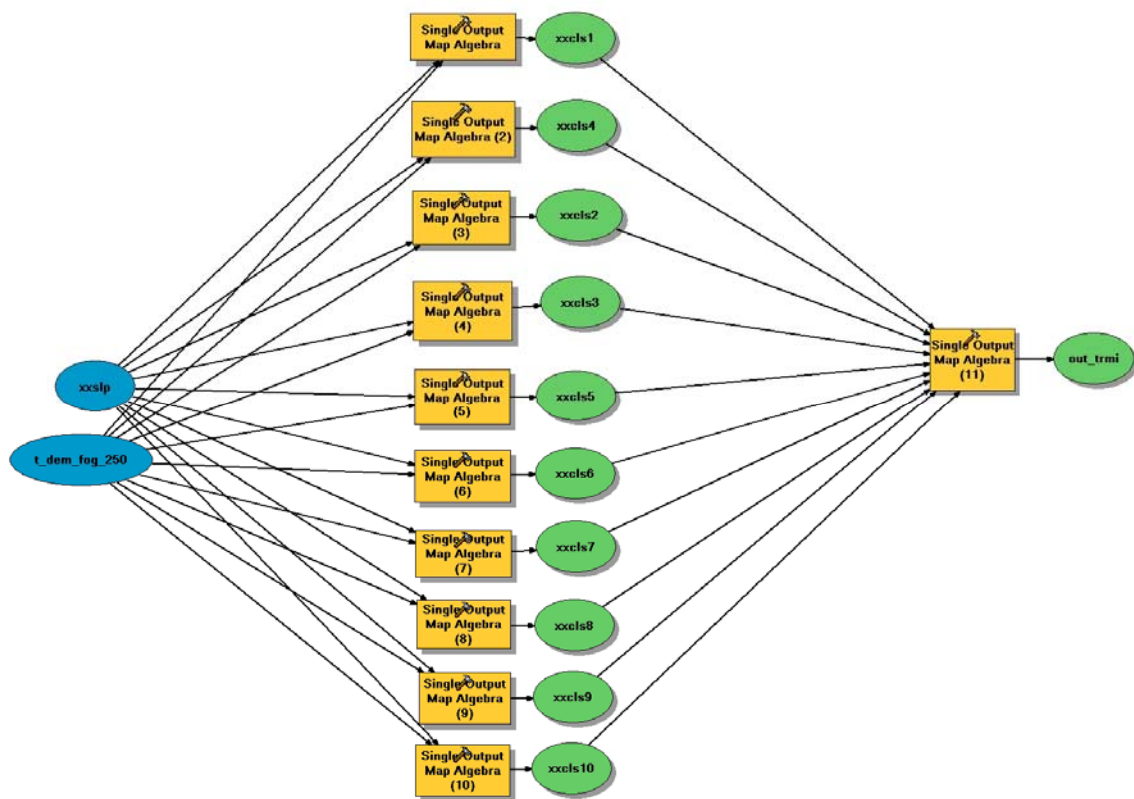


Figura 7.9: Il quattordicesimo step per il calcolo del TRMI.

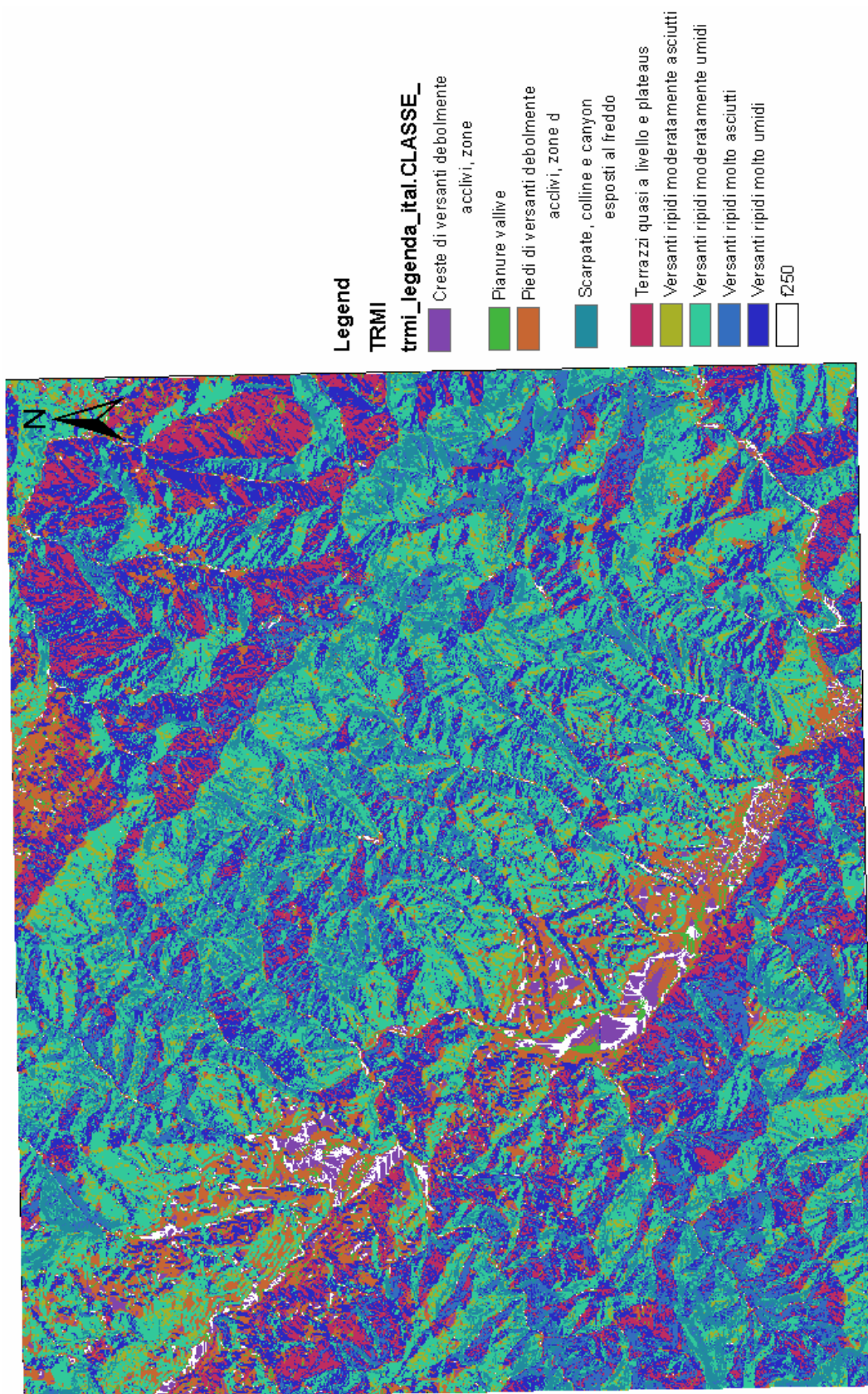


Figura 7.10: Mappa della distribuzione del TRMI (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

7.4 RELAZIONE FRA DISTANZA DALLE ASTE FLUVIALI, TRMI, LITOLOGIA, PENDENZA, USO DEL SUOLO E FRANOSITÀ

7.4.1 LA CREAZIONE DELLA UCU5 E LA RELAZIONE FRA UCU5 E FRANOSITÀ

Per individuare delle Unità a Condizioni Uniche in termini di distanza dalle aste fluviali, TRMI, litologia, pendenza ed uso del suolo (Corine), si fa ancora uso del “Model builder” di ArcToolbox, usando per la sovrapposizione dei temi la seguente codifica:

$$\text{Corine} * 100000000 + \text{acclività} * 1000000 + \text{litologia} * 10000 + \\ \text{trmi} * 100 + \text{buffer} \quad (7.2)$$

In questo modo si otterrà un codice XXYYZZHHKK in cui le cifreXX identificano la classe di uso del suolo, le cifre YY identificano la classe di pendenza, le cifre ZZ la classe litologica di appartenenza, le cifre HH la classe di TRMI e le cifre KK la distanza dalle aste fluviali.

Per quanto riguarda la distanza dalle aste fluviali, dato che occorre comunque avere uno strato informativo di tipo raster, è opportuno non utilizzare la funzione “BUFFER”, bensì la funzione “Euclidean Distance” dello “Spatial Analyst Tool”. Poi si ritaglia il raster secondo il contorno del Foglio 250 con la funzione ”Extract by mask” dello “Spatial Analyst Tools: si ottiene “dis_fiu_mask”.

Per ottenere un raster con delle classi ben definite bisogna riclassificare in modo da ottenere delle fasce di distanza di 100m.

Il modello in Figura 7.11 trasforma in raster i temi che rappresentano i dati di input e poi li sovrappone mediante operazioni di Map Algebra.

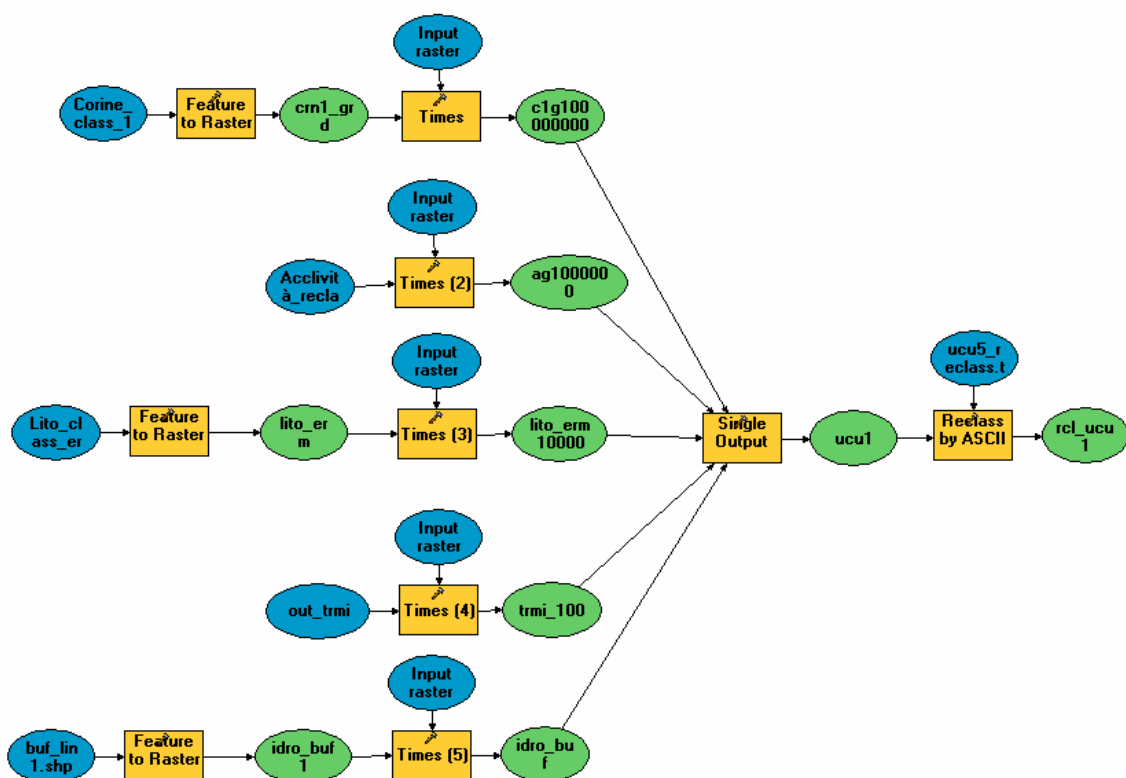


Figura 7.11: Il modello per il calcolo delle UCU5.

Poi si passa alle elaborazioni statistiche, calcolando la distribuzione areale di frana, incrociando lo strato informativo delle UCU5 con quello delle frane.

Lo strato informativo così ottenuto è stato riclassificato secondo il seguente schema (utilizzando un file ASCII appositamente prodotto):

Tabella 7.2: La tabella utilizzata per la riclassificazione dello strato informativo raster UCU5_Frn.

Percentuale in frana	Classe di pericolosità	Grado di pericolosità
0 - 1 %	1	Molto Bassa
1 - 6 %	2	Bassa
6 - 10 %	3	Media
10 - 20 %	4	Alta
20 - 100 %	5	Molto Alta

Il file ottenuto si chiama: “rcl_u cu5_Frn”.

In Figura 7.13 c si vuole rappresentare quale percentuale di ciascuna classe di pericolosità risulta instabile secondo l’archivio IFFI: si ottiene un risultato abbastanza coerente, in quanto la percentuale cresce al crescere della classe di pericolosità.

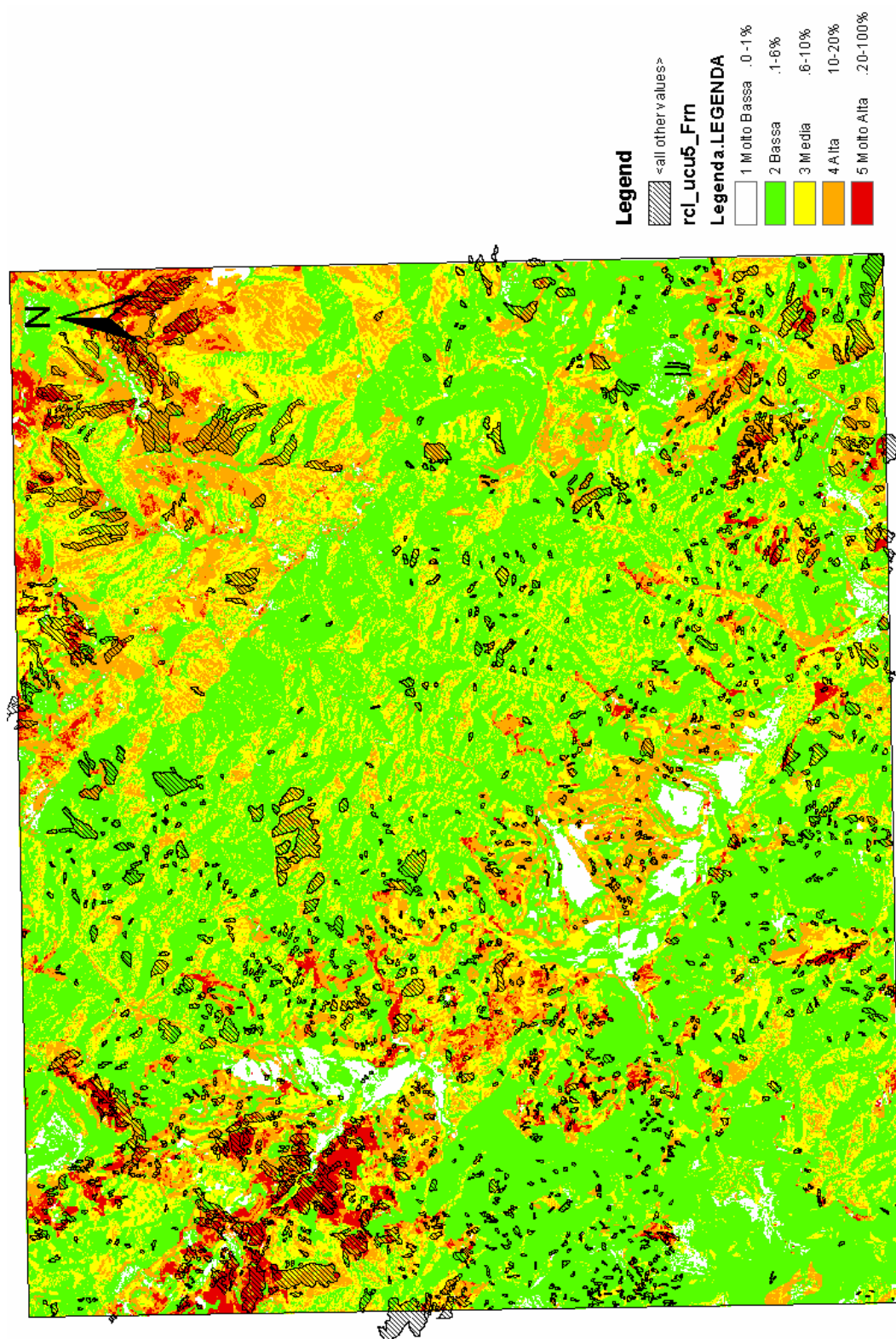
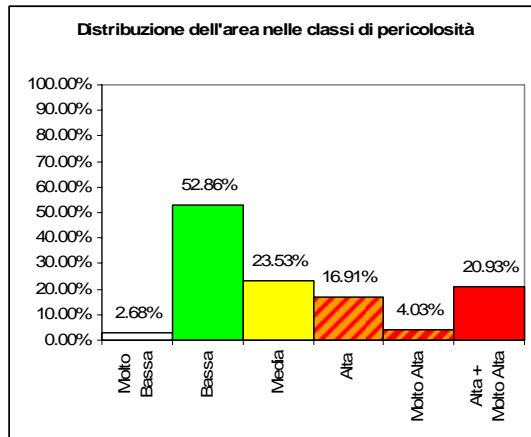
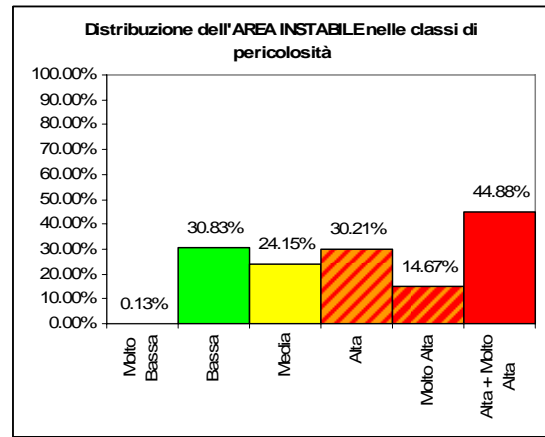


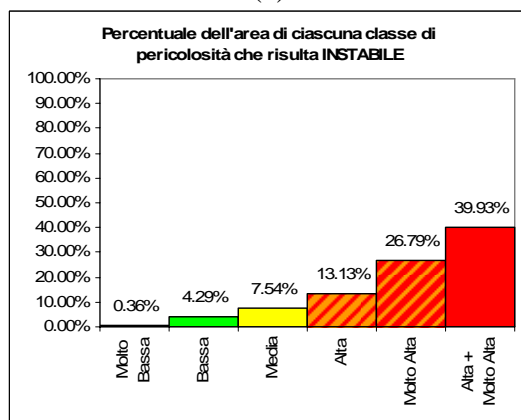
Figura 7.12: Mappa delle UCU5 a confronto con i poligoni delle frane IFFI (Adattamento da originale in scala 1:50.000).



(a)



(b)



(c)

Figura 7.13: Analisi statistica delle classi di pericolosità ottenute col metodo delle UCU5.

- (a) Istogramma della distribuzione dell'area di ciascuna classe di pericolosità all'interno dell'area di studio, in termini percentuali
- (b) Istogramma della distribuzione dell'area instabile individuata mediante l'archivio IFFI all'interno di ciascuna Classe di pericolosità.
- (c) Istogramma della percentuale di ciascuna classe che risulta instabile secondo l'archivio IFFI.

Con il metodo delle UCU5 si è già ottenuto un ottimo risultato: si è trovato che solo il 20,93% dell'area rientra nelle classi di pericolosità “Alta” o “Molto Alta” (Figura 7.30 a). Però, confrontando la classificazione ottenuta con la distribuzione effettiva delle frane secondo l'archivio IFFI (Figura 7.30 b) si nota che il 44,88% dell'area valutata nelle classi di pericolosità “Alta” o “Molto Alta” risulta in frana, ma d'altra parte, risulta in frana ben il 30,83% dell'area che ricade in classe “Bassa” ed il 24,15% dell'area che ricade in classe “Media”.

7.4.2 APPLICAZIONE DI FUNZIONI FILTRO

Poiché si è operato con grid le cui maglie hanno dimensioni 20x20m, il risultato in termini grafici a volte può portare a pixel isolati appartenenti ad una classe diversa da quella dei dintorni. Per limitare questo tipo di problemi si possono applicare delle funzioni “filtro” che aiutano a smorzare gli eventuali pixel isolati

(SpatialAnalystTools\Neighborhood\FocalStatistic).

Si sceglie di applicare i seguenti filtri:

FILTRI CIRCOLARI:

1°FILTRO: Massimo all'interno di un'area circolare di raggio 3 celle.

2°FILTRO: Massimo all'interno di un'area circolare di raggio 5 celle.

3°FILTRO: Moda all'interno di un'area circolare di raggio 3 celle.

4°FILTRO: Moda all'interno di un'area circolare di raggio 5 celle.

FILTRI RETTANGOLARI:

5°FILTRO: Massimo all'interno di un'area Quadrata di lato 3 celle.

6°FILTRO: Massimo all'interno di un'area Quadrata di lato 5 celle.

7°FILTRO: Moda all'interno di un'area Quadrata di lato 3 celle.

8°FILTRO: Moda all'interno di un'area Quadrata di lato 5 celle.

Dopo aver applicato i filtri si svolgeranno delle analisi statistiche:

- Sulla distribuzione percentuale delle Classi di pericolosità all'interno dell'area di studio.
- Sulla distribuzione dell'area instabile individuata mediante l'archivio IFFI all'interno di ciascuna Classe di pericolosità.
- Sulla percentuale di ciascuna classe che risulta instabile secondo l'archivio IFFI.

In Tabella 7.3 si riporta la ripartizione dell'area totale della mappa [m²] nelle varie classi di pericolosità al variare del tipo di filtro applicato, mentre in Tabella 7.4 la ripartizione dell'area instabile all'interno di ciascuna classe di pericolosità. È positivo osservare che la maggior parte dei pixel instabili rientra nelle classi più alte di pericolosità: questo è un primo indice di efficienza del metodo adottato.

Tabella 7.3: L'area totale della mappa [m²] e la sua ripartizione nelle varie classi di pericolosità al variare del tipo di filtro applicato.

Area TOTALE			PERICOLOSITÀ					
			Molto Bassa	Bassa	Media	Alta	Molto Alta	Alta + Molto Alta
			At_P1	At_P2	At_P3	At_P4	At_P5	At_P4+At_P5
ORIGINALE		592641600	15888000	313246400	139456400	100196000	23854800	124050800
1° FILTRO:	Max ●3	597990000	3041200	124399200	185852400	210271200	74426000	284697200
2° FILTRO:	Max ●5	601110400	1449200	71012800	168240800	251869600	108538000	360407600
3° FILTRO:	Moda ●3	590090000	13753200	332522000	124580800	96988800	22245200	119234000
4° FILTRO:	Moda ●5	596438800	12780400	348857200	116524800	97163200	21113200	118276400
5° FILTRO:	Max □3	594549200	6094800	196305600	181342400	162633200	48173200	210806400
6° FILTRO:	Max □5	596360000	3372400	134416000	186379200	202690400	69502000	272192400
7° FILTRO:	Moda □3	584160000	14485600	320580000	130257200	96252400	22584800	118837200
8° FILTRO:	Moda □5	588234400	13836400	330216000	125196400	96736000	22249600	118985600

Tabella 7.4: L'area instabile della mappa [m²] e la sua ripartizione nelle varie classi di pericolosità al variare del tipo di filtro applicato.

Area INSTABILE			PERICOLOSITÀ					
			Molto Bassa	Bassa	Media	Alta	Molto Alta	Alta + Molto Alta
			Ainst_P1	Ainst_P2	Ainst_P3	Ainst_P4	Ainst_P5	Ainst(P4+P5)
ORIGINALE		43559600	57200	13430800	10520400	13160000	6391200	19551200
1° FILTRO:	Max ●3	43796400	400	4220400	8065600	18068800	13441200	31510000
2° FILTRO:	Max ●5	43928800	400	2272800	6549200	18336000	16770400	35106400
3° FILTRO:	Moda ●3	43192400	33200	13636400	9974800	13053200	6494800	19548000
4° FILTRO:	Moda ●5	43557600	46000	14269600	9726400	13067600	6448000	19515600
5° FILTRO:	Max □3	43643600	1600	7124400	9677600	16610400	10229600	26840000
6° FILTRO:	Max □5	43725600	0	4623200	8299600	17908800	12894000	30802800
7° FILTRO:	Moda □3	42854000	30000	13332400	10181600	12917600	6392400	19310000
8° FILTRO:	Moda □5	43091200	31600	13571200	9968400	13034400	6485600	19520000

In Tabella 7.5 si riporta la ripartizione percentuale dell'area della mappa fra le varie classi di pericolosità al variare del tipo di filtro applicato, ottenuta con l'espressione: $\frac{A_{classe}}{A_{tot}} \cdot 100$,

mentre in Tabella 7.6 la ripartizione percentuale dell'area instabile fra le varie classi di pericolosità, al variare del tipo di filtro applicato, ottenuta con l'espressione:

$$\frac{A_{inst_classe}}{A_{inst_tot}} \cdot 100.$$

Tabella 7.5: Ripartizione percentuale dell'area della mappa fra le varie classi di pericolosità al variare del tipo di filtro applicato, ottenuta con l'espressione $\frac{A_{classe}}{A_{tot}} \cdot 100$.

Area TOTALE			PERICOLOSITÀ						
			Molto Bassa	Bassa	Media	Alta	Molto Alta	Alta + Molto Alta	Media + Alta + Molto Alta
			%t_P1	%t_P2	%t_P3	%t_P4	%t_P5		
ORIGINALE		100 %	2.68%	52.86%	23.53%	16.91%	4.03%	20.93%	44.46%
1° FILTRO:	Max ●3	100 %	0.51%	20.80%	31.08%	35.16%	12.45%	47.61%	78.69%
2° FILTRO:	Max ●5	100 %	0.24%	11.81%	27.99%	41.90%	18.06%	59.96%	87.95%
3° FILTRO:	Moda ●3	100 %	2.33%	56.35%	21.11%	16.44%	3.77%	20.21%	41.32%
4° FILTRO:	Moda ●5	100 %	2.14%	58.49%	19.54%	16.29%	3.54%	19.83%	39.37%
5° FILTRO:	Max □3	100 %	1.03%	33.02%	30.50%	27.35%	8.10%	35.46%	65.96%
6° FILTRO:	Max □5	100 %	0.57%	22.54%	31.25%	33.99%	11.65%	45.64%	76.90%
7° FILTRO:	Moda □3	100 %	2.48%	54.88%	22.30%	16.48%	3.87%	20.34%	42.64%
8° FILTRO:	Moda □5	100 %	2.35%	56.14%	21.28%	16.45%	3.78%	20.23%	41.51%

Tabella 7.6: Ripartizione percentuale dell'area instabile fra le varie classi di pericolosità, al variare del tipo di filtro applicato, ottenuta con l'espressione: $\frac{A_{inst_classe}}{A_{inst_tot}} \cdot 100$.

Area TOTALE			PERICOLOSITÀ						
			Molto Bassa	Bassa	Media	Alta	Molto Alta	Alta + Molto Alta	Media + Alta + Molto Alta
			%t_P1	%t_P2	%t_P3	%t_P4	%t_P5		
ORIGINALE		100 %	0.13%	30.83%	24.15%	30.21%	14.67%	44.88%	69.04%
1° FILTRO:	Max ●3	100 %	0.00%	9.64%	18.42%	41.26%	30.69%	71.95%	90.36%
2° FILTRO:	Max ●5	100 %	0.00%	5.17%	14.91%	41.74%	38.18%	79.92%	94.83%
3° FILTRO:	Moda ●3	100 %	0.08%	31.57%	23.09%	30.22%	15.04%	45.26%	68.35%
4° FILTRO:	Moda ●5	100 %	0.11%	32.76%	22.33%	30.00%	14.80%	44.80%	67.13%
5° FILTRO:	Max □3	100 %	0.00%	16.32%	22.17%	38.06%	23.44%	61.50%	83.67%
6° FILTRO:	Max □5	100 %	0.00%	10.57%	18.98%	40.96%	29.49%	70.45%	89.43%
7° FILTRO:	Moda □3	100 %	0.07%	31.11%	23.76%	30.14%	14.92%	45.06%	68.82%
8° FILTRO:	Moda □5	100 %	0.07%	31.49%	23.13%	30.25%	15.05%	45.30%	68.43%

Nella Figura 7.13, Figura 7.14, Figura 7.15, Figura 7.16, Figura 7.17, per ciascun filtro applicato, si riportano l'istogramma della distribuzione dell'area di ciascuna classe di pericolosità all'interno dell'area di studio, in termini percentuali e l'istogramma della distribuzione dell'area instabile individuata mediante l'archivio IFFI all'interno di ciascuna Classe di pericolosità.

Non si riportano tutte le mappe ottenute con l'applicazione dei filtri descritti, ma solo quella relativa al FILTRO 2 (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), che risulta la più attendibile.

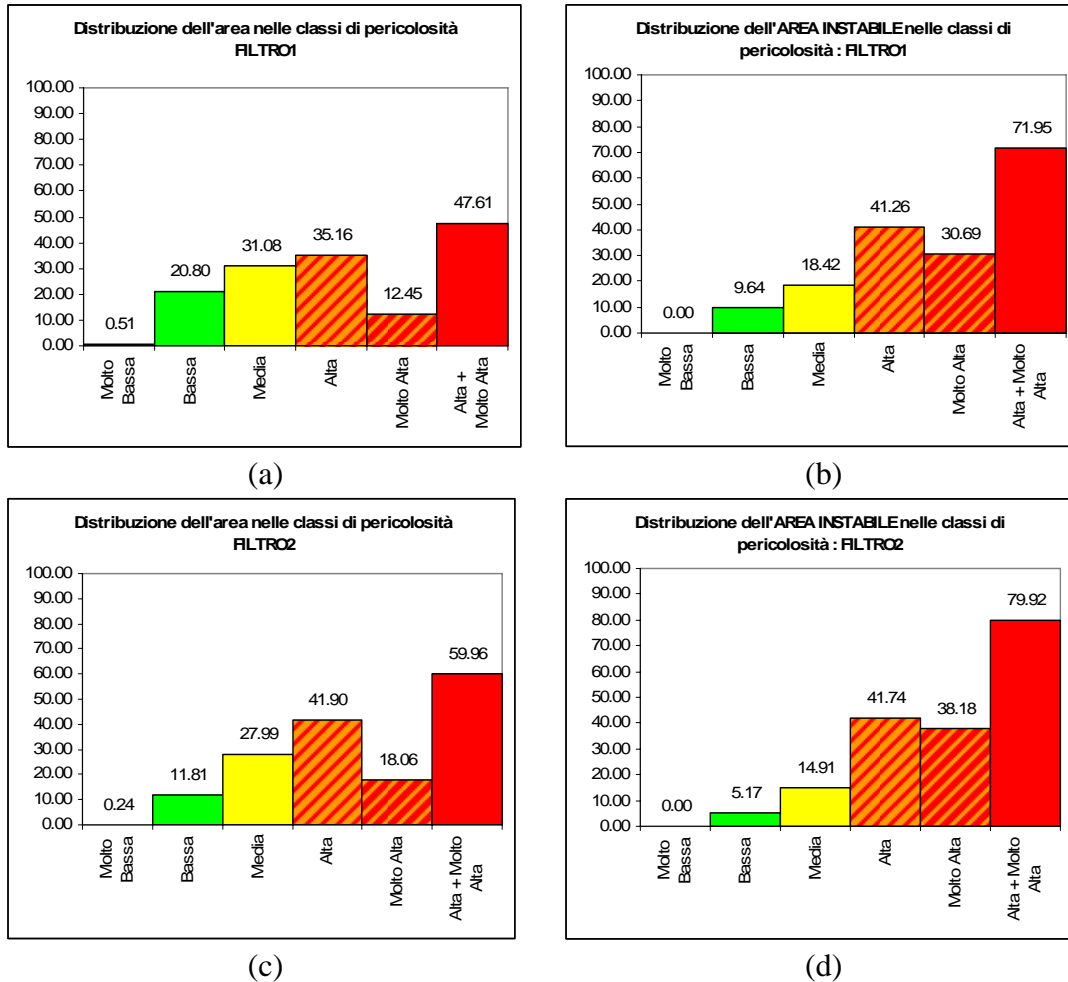


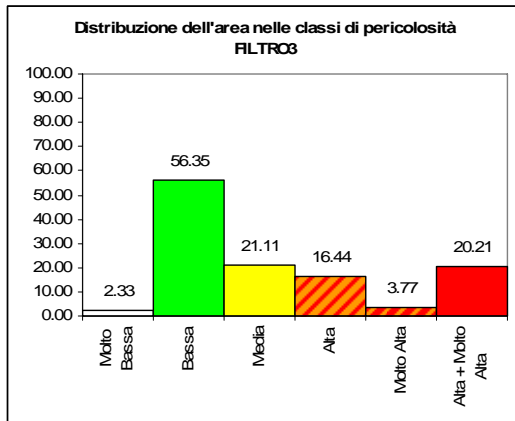
Figura 7.14: Analisi statistica delle classi di pericolosità ottenute col metodo delle UCU5 e l'applicazione del FILTRO 1 e del FILTRO 2.

FILTRO 1

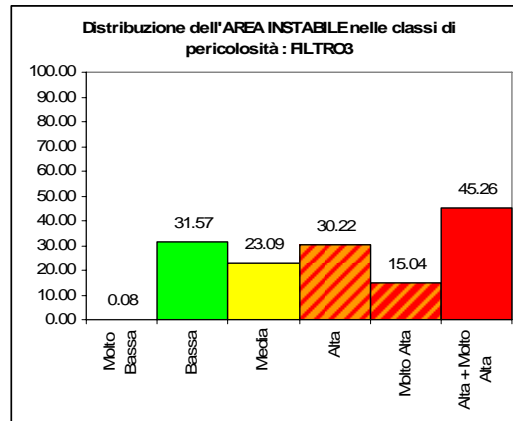
- (a) Istogramma della distribuzione dell'area di ciascuna classe di pericolosità all'interno dell'area di studio, in termini percentuali
- (b) Istogramma della distribuzione dell'area instabile individuata mediante l'archivio IFFI all'interno di ciascuna Classe di pericolosità.

FILTRO 2

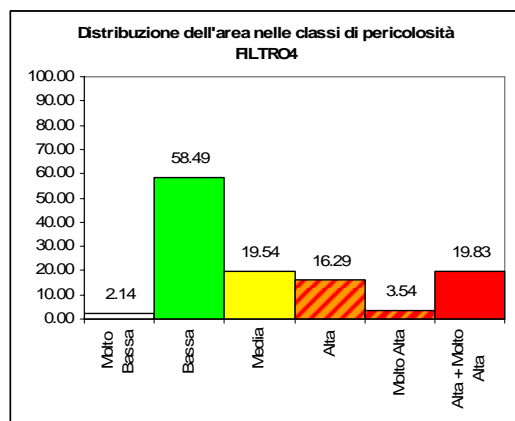
- (c) Istogramma della distribuzione dell'area di ciascuna classe di pericolosità all'interno dell'area di studio, in termini percentuali
- (d) Istogramma della distribuzione dell'area instabile individuata mediante l'archivio IFFI all'interno di ciascuna Classe di pericolosità.



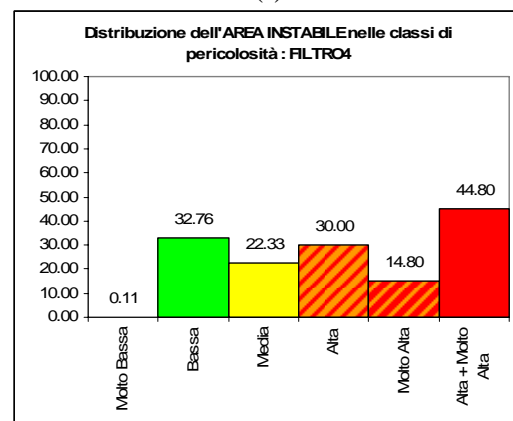
(e)



(f)



(g)



(h)

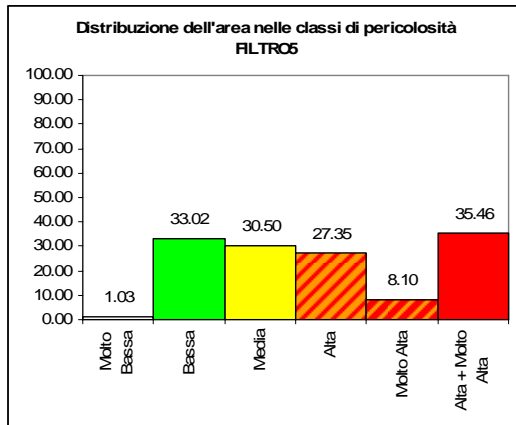
Figura 7.15: Analisi statistica delle classi di pericolosità ottenute col metodo delle UCU5 e l'applicazione del FILTRO 3 e del FILTRO 4.

FILTRO 3

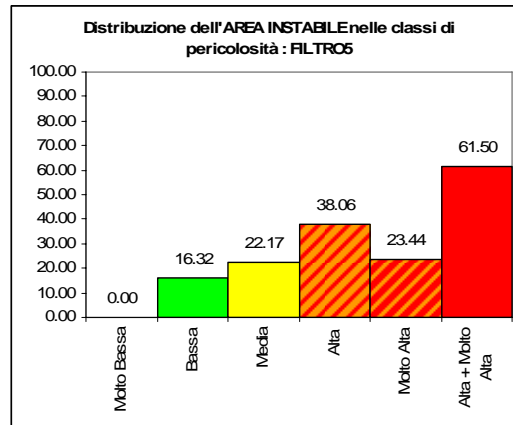
- (e) Istogramma della distribuzione dell'area di ciascuna classe di pericolosità all'interno dell'area di studio, in termini percentuali
- (f) Istogramma della distribuzione dell'area instabile individuata mediante l'archivio IFFI all'interno di ciascuna Classe di pericolosità.

FILTRO 4

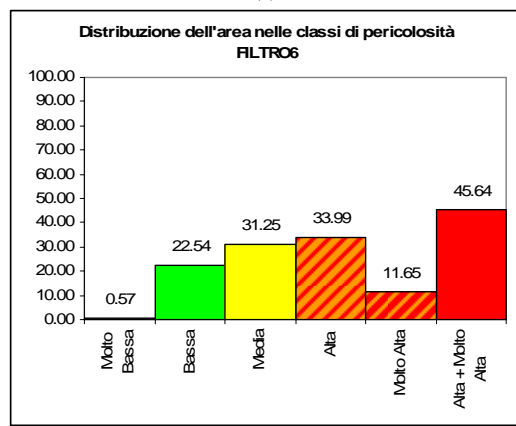
- (g) Istogramma della distribuzione dell'area di ciascuna classe di pericolosità all'interno dell'area di studio, in termini percentuali
- (h) Istogramma della distribuzione dell'area instabile individuata mediante l'archivio IFFI all'interno di ciascuna Classe di pericolosità.



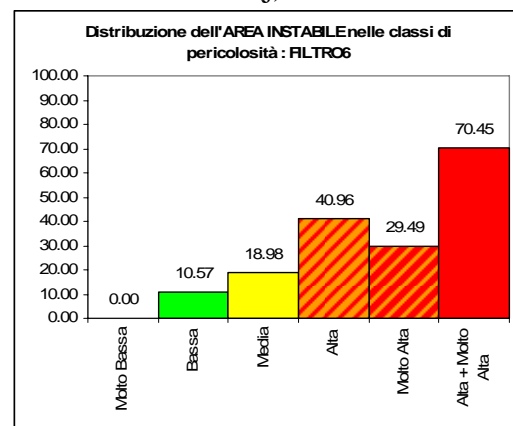
(i)



(j)



(k)



(l)

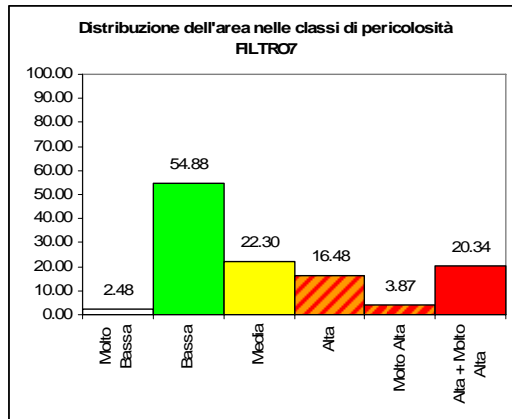
Figura 7.16: Analisi statistica delle classi di pericolosità ottenute col metodo delle UCU5 e l'applicazione del FILTRO 5 e del FILTRO 6.

FILTRO 5

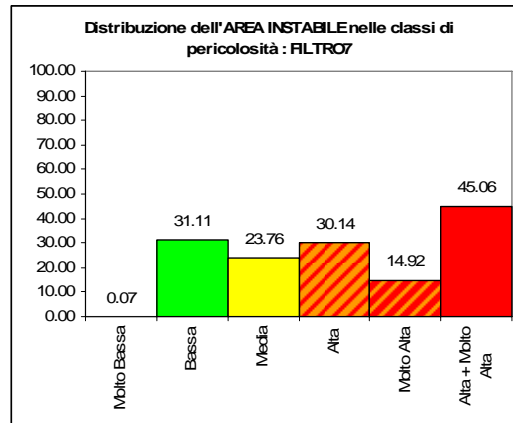
- (i) Istogramma della distribuzione dell'area di ciascuna classe di pericolosità all'interno dell'area di studio, in termini percentuali
- (j) Istogramma della distribuzione dell'area instabile individuata mediante l'archivio IFFI all'interno di ciascuna Classe di pericolosità.

FILTRO 6

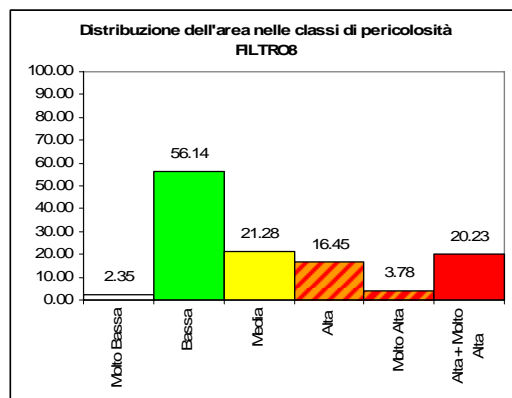
- (k) Istogramma della distribuzione dell'area di ciascuna classe di pericolosità all'interno dell'area di studio, in termini percentuali
- (l) Istogramma della distribuzione dell'area instabile individuata mediante l'archivio IFFI all'interno di ciascuna Classe di pericolosità.



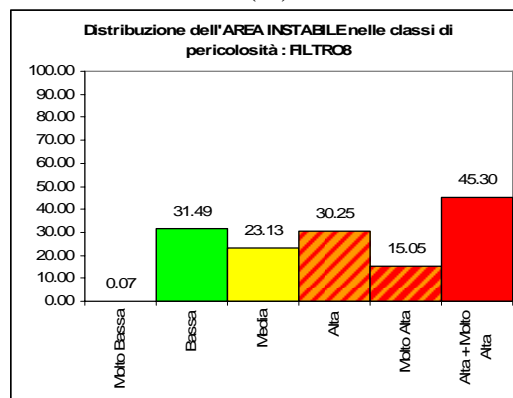
(l)



(m)



(n)



(o)

Figura 7.17: Analisi statistica delle classi di pericolosità ottenute col metodo delle UCU5 e l'applicazione del FILTRO 7 e del FILTRO 8.

FILTRO 7

- (m) Istogramma della distribuzione dell'area di ciascuna classe di pericolosità all'interno dell'area di studio, in termini percentuali
- (n) Istogramma della distribuzione dell'area instabile individuata mediante l'archivio IFFI all'interno di ciascuna Classe di pericolosità.

FILTRO 8

- (o) Istogramma della distribuzione dell'area di ciascuna classe di pericolosità all'interno dell'area di studio, in termini percentuali
- (p) Istogramma della distribuzione dell'area instabile individuata mediante l'archivio IFFI all'interno di ciascuna Classe di pericolosità.

7.4.3 INDICE DI EFFICIENZA

Si vuole valutare l'efficienza di questo tipo di classificazione nell'identificazione delle aree con una certa pericolosità da frana.

Si utilizza la tecnica della **MATRICE DEI CASI CORRETTAMENTE CLASSIFICATI**.
L'Indice di efficienza del modello si calcola così:

$$I_{eff} = \frac{(1) + (2)}{(1) + (2) + (3) + (4)} \quad (7.3)$$

In cui:

- (1) unità territoriali predette come stabili e prive di depositi franosi;
 - unità territoriali predette come instabili e interessate da corpi di frana;
 - unità territoriali predette come instabili ma prive di depositi franosi;
 - unità territoriali predette come stabili e interessate da corpi di frana.

In questo caso:

Tabella 7.7: Distribuzione dei pixel fra le varie classi di indice di stabilità in funzione del tipo di filtro applicato

		Molto Bassa	Bassa	Media	Alta	Molto Alta	Alta + Molto Alta	Bassa + Molto Bassa	TOTALI
STABILITY INDEX		39720	783116	348641	250490	59637	310127	822836	1481604
FILTRO1	Min ·3	7603	310998	464631	525678	186065	711743	318601	1494975
FILTRO2	Min ·5	3623	177532	420602	629674	271345	901019	181155	1502776
FILTRO3	Media ·3	34383	831305	311452	242472	55613	298085	865688	1475225
FILTRO4	Media ·5	31951	872143	291312	242908	52783	295691	904094	1491097
FILTRO5	Min ...3	15237	490764	453356	406583	120433	527016	506001	1486373
FILTRO6	Min 5	8431	336040	465948	506726	173755	680481	344471	1490900
FILTRO7	Media 3	36214	801450	325643	240631	56462	297093	837664	1460400
FILTRO8	Media 5	34591	825540	312991	241840	55624	297464	860131	1470586

Tabella 7.8: Distribuzione dei pixel stabili fra le varie classi di indice di stabilità in funzione del tipo di filtro applicato

		Molto Bassa	Bassa	Media	Alta	Molto Alta	Alta + Molto Alta	Bassa + Molto Bassa	TOTALI
STABILITY INDEX		39577	749539	322340	217590	43659	261249	789116	1372705
FILTRO1	Min ·3	7602	300447	444467	480506	152462	632968	308049	1385484
FILTRO2	Min ·5	3622	171850	404229	583834	229419	813253	175472	1392954
FILTRO3	Media ·3	34300	797214	286515	209839	39376	249215	831514	1367244
FILTRO4	Media ·5	31836	836469	266996	210239	36663	246902	868305	1382203
FILTRO5	Min ...3	15233	472953	429162	365057	94859	459916	488186	1377264
FILTRO6	Min 5	8431	324482	445199	461954	141520	603474	332913	1381586
FILTRO7	Media 3	36139	768119	300189	208337	40481	248818	804258	1353265
FILTRO8	Media 5	34512	791612	288070	209254	39410	248664	826124	1362858

Tabella 7.9: Distribuzione dei pixel instabili fra le varie classi di indice di stabilità in funzione del tipo di filtro applicato

		Molto Bassa	Bassa	Media	Alta	Molto Alta	Alta + Molto Alta	Bassa + Molto Bassa	TOTALI
STABILITY INDEX		143	33577	26301	32900	15978	48878	33720	108899
FILTRO1	Min ·3	1	10551	20164	45172	33603	78775	10552	109491
FILTRO2	Min ·5	1	5682	16373	45840	41926	87766	5683	109822
FILTRO3	Media ·3	83	34091	24937	32633	16237	48870	34174	107981
FILTRO4	Media ·5	115	35674	24316	32669	16120	48789	35789	108894
FILTRO5	Min ...3	4	17811	24194	41526	25574	67100	17815	109109
FILTRO6	Min 5	0	11558	20749	44772	32235	77007	11558	109314
FILTRO7	Media 3	75	33331	25454	32294	15981	48275	33406	107135
FILTRO8	Media 5	79	33928	24921	32586	16214	48800	34007	107728

Tabella 7.10: Calcolo dell'Indice di Efficienza per ciascuna classificazione

		STAB_NO FRANA	INSTAB_FRANA	INSTAB_NO FRANA	STAB_FRANA			
LEGENDA		(1)	(2)	(3)	(4)	(1)+(2)	(1)+(2)+(3) +(4)	PM
STABILITY INDEX		789116	48878	33720	261249	837994	1132963	73.96%
FILTRO1	Min :3	308049	78775	10552	632968	386824	1030344	37.54%
FILTRO2	Min :5	175472	87766	5683	813253	263238	1082174	24.32%
FILTRO3	Media :3	831514	48870	34174	249215	880384	1163773	75.65%
FILTRO4	Media :5	868305	48789	35789	246902	917094	1199785	76.44%
FILTRO5	Min ...3	488186	67100	17815	459916	555286	1033017	53.75%
FILTRO6	Min ...5	332913	77007	11558	603474	409920	1024952	39.99%
FILTRO7	Media ...3	804258	48275	33406	248818	852533	1134757	75.13%
FILTRO8	Media ...5	826124	48800	34007	248664	874924	1157595	75.58%

Nella Tabella 7.10 si può notare che il FILTRO 4 è quello che ha il miglior indice di efficienza. Ma bisogna prendere in considerazione solo i casi in cui si è classificata pericolosa un'area inferiore al 70%.

FILTRO 4
 Filtro circolare di
 raggio pari a 5 celle.
 Fra i valori compresi
 si prende la Moda

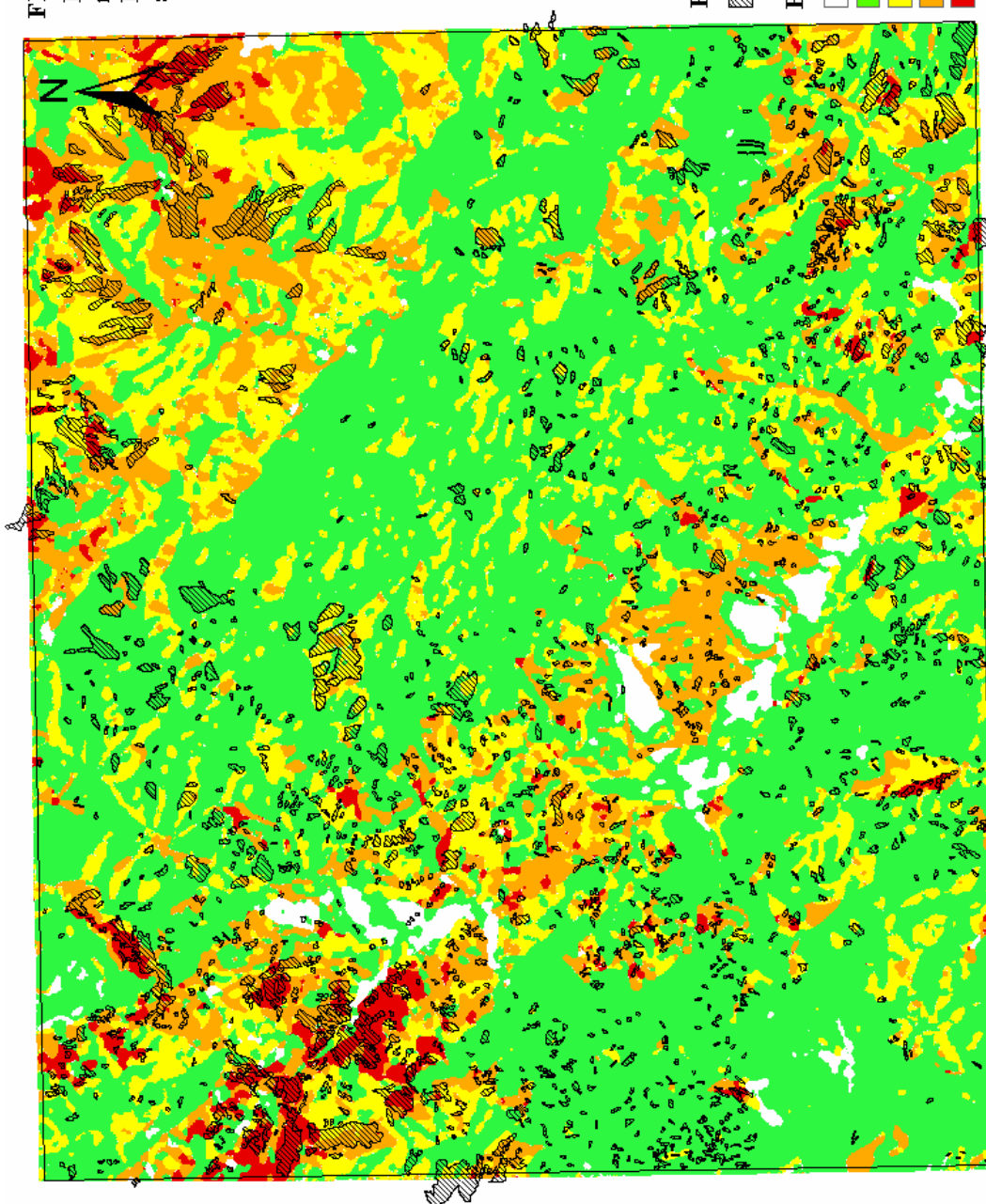


Figura 7.18: Mappa di pericolosità ottenuta con l'analisi statistica.

8 ELABORAZIONI DETERMINISTICHE

8.1 IL SOFTWARE SINMAP

Il software SINMAP è implementato mediante una serie di routines scritte in linguaggio C, che possono essere richiamate per svolgere una serie di calcoli, come quello del fattore di sicurezza e dell'indice di stabilità.

Inoltre è disponibile una libreria di routines aggiuntive per svolgere alcune operazioni base di manipolazione del DEM, come il “pit-filling”, il calcolo delle pendenze, la determinazione della direzione di flusso e la definizione dell'area drenante verso un punto specifico. Anche tali routines sono scritte in linguaggio C e sono contenute in una libreria dinamica (file di tipo DDL).

Per la natura geografica spaziale di SINMAP gli output devono essere espressi sotto forma di mappe, da visualizzare su monitor o da stampare. SINMAP 2.0 non ha una modalità di visualizzazione personalizzata, ma si appoggia ad ArcGIS 9.0 (ESRI) o alle versioni successive, aggiungendo una barra di menù ad ArcMap.

Il prodotto di una elaborazione SINMAP è pertanto un documento ArcMap nel quale vengono individuate aree di potenziale instabilità dei versanti.

I dati richiesti in input sono:

1. una griglia DEM, che fornisce la base topografica dello studio;
2. una seconda griglia che fornisce i dati non topografici, ovvero i parametri del terreno ed i dati idrologici, classificati all'interno di 'regioni di calibrazione';
3. uno shape di punti che indica la collocazione puntuale delle frane (se l'utente vuole confrontare la posizione delle frane reali con le aree in cui viene prevista instabilità).

In output si hanno sei files di tipo grid, che rappresentano rispettivamente:

1. la distribuzione geografica della topografia senza le eventuali cavità,
2. l'acclività,
3. la direzione di flusso,
4. l'area contribuente specifica,
5. il grado di saturazione

6. l'indice di stabilità.

Quindi, uno studio SINMAP completo porta alla creazione di un progetto ArcMap che contiene nove temi GIS.

Oltre al display di tipo geografico, SINMAP fornisce anche un diagramma per l'interpretazione dei dati dell'area di studio e per la loro calibrazione. Esistono quattro tipologie di questi grafici:

2. **Normal cell data:** riportano l'andamento delle aree di alimentazione specifica rispetto alla pendenza, per un campionamento delle celle dell'area di studio non soggette a frana.
3. **Landslide cell data:** in questo grafico le frane vengono rappresentate in termini dei valori della pendenza e dell'area di alimentazione specifica per ciascun punto della griglia che sia in frana.
4. **Stability index region lines:** sono cinque linee che rappresentano i confini delle regioni all'interno dello spazio pendenza-area di alimentazione specifica che abbiano potenzialità analoga per la stabilità o l'instabilità.
5. **Saturation region lines:** queste tre linee rappresentano i contorni per le regioni all'interno dello spazio pendenza-area di alimentazione specifica che abbiano simili potenziali di umidità.

8.2 I PARAMETRI DI INPUT

La base topografica scelta per lo studio è il DEM IGM 2x20, "dem_fog_250", che per l'occasione è stato rinominato "dem250" (Figura 8.1).

Si assegnano i parametri di base come da default, ovvero:

Costante di gravità: $g = 9.81 \text{ m/s}^2$;

Densità dell'acqua: $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$;

Numero di punti nel grafico SA (Pendenza-Area): $N^* = 2000$;

Valore minimo dell'indice di umidità nel grafico SA (Pendenza-Area): $w = 10\%$;

Poi bisogna suddividere l'area di studio in opportune regioni ed assegnare a ciascuna di esse i parametri di calibrazione. In questa applicazione si è scelto di creare le regioni in funzione della litologia ed assegnare a ciascun tipo litologico un certo set di parametri opportunamente calcolati (Tabella 8.1; Figura 8.2).

Tabella 8.1: I parametri assegnati alle regioni di calibrazione.

ID			trmin	trmax	cmin	cmax	phimin	phimax	SoilDens
1	1	Altro	2000	3000	0	10	30	45	2600
2	A1	calcari	2000	3000	0	10	30	45	2600
3	A10	complessi pelitico-arenacei	2000	3000	0	2	30	45	2600
4	A11	complessi calcareo-arenacei	2000	3000	0	3	30	45	2600
5	A2	dolomie	2000	3000	0	10	30	45	2600
6	A3	calcari marnosi	2000	3000	0	10	30	45	2600
7	A4	diaspri	2000	3000	0	10	30	45	2600
8	A7	marne	2000	3000	0	2	30	45	2600
9	A8	conglomerati	2000	3000	0	2	30	45	2600
10	B2	terreni prevalentemente sabbiosi	900	2600	0	3	25	30	1900
11	B3	terreni prevalentemente ghiaiosi	8700	26000	0	15	30	35	1900
12	B4	terreni a granulometria mista	400	1500	0	0.75	20	25	2000
13	B7	terreni a granulometria indefinita	400	1500	0	0.75	30	35	2000
14	C1	argille caotiche	1500	2500	0	0.75	15	20	1900
15	D2	Lave neutre	2000	3000	0	10	30	45	2600
16	E1	rocce granitoidi	2000	3000	0	10	30	45	2600
17	F1	filladi e micascisti	2000	3000	0	10	30	45	2600
18	F2	gneiss	2000	3000	0	10	30	45	2600
19	F5	serpentiniti	2000	3000	0	10	30	45	2600

Si inserisce uno shape di punti che indica i punti di innesco delle frane: si è scelto di caricare il file dei PIFF del Data Base IFFI.

A questo punto si fanno le elaborazioni preliminari sulla griglia del DEM, ovvero le operazioni di “pit-filling” (Figura 8.3), di calcolo della Direzione di flusso (Figura 8.4) e della pendenza (Figura 8.5) e di calcolo dell’area di captazione specifica (Figura 8.6).

Infine si fa il calcolo dell’Indice di Stabilità (Figura 8.7) e dell’Indice di Saturazione (Figura 8.8).

A questo punto si può procedere alle elaborazioni statistiche a partire dai risultati del software, che sono riportati in: nelle Tabelle 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6.

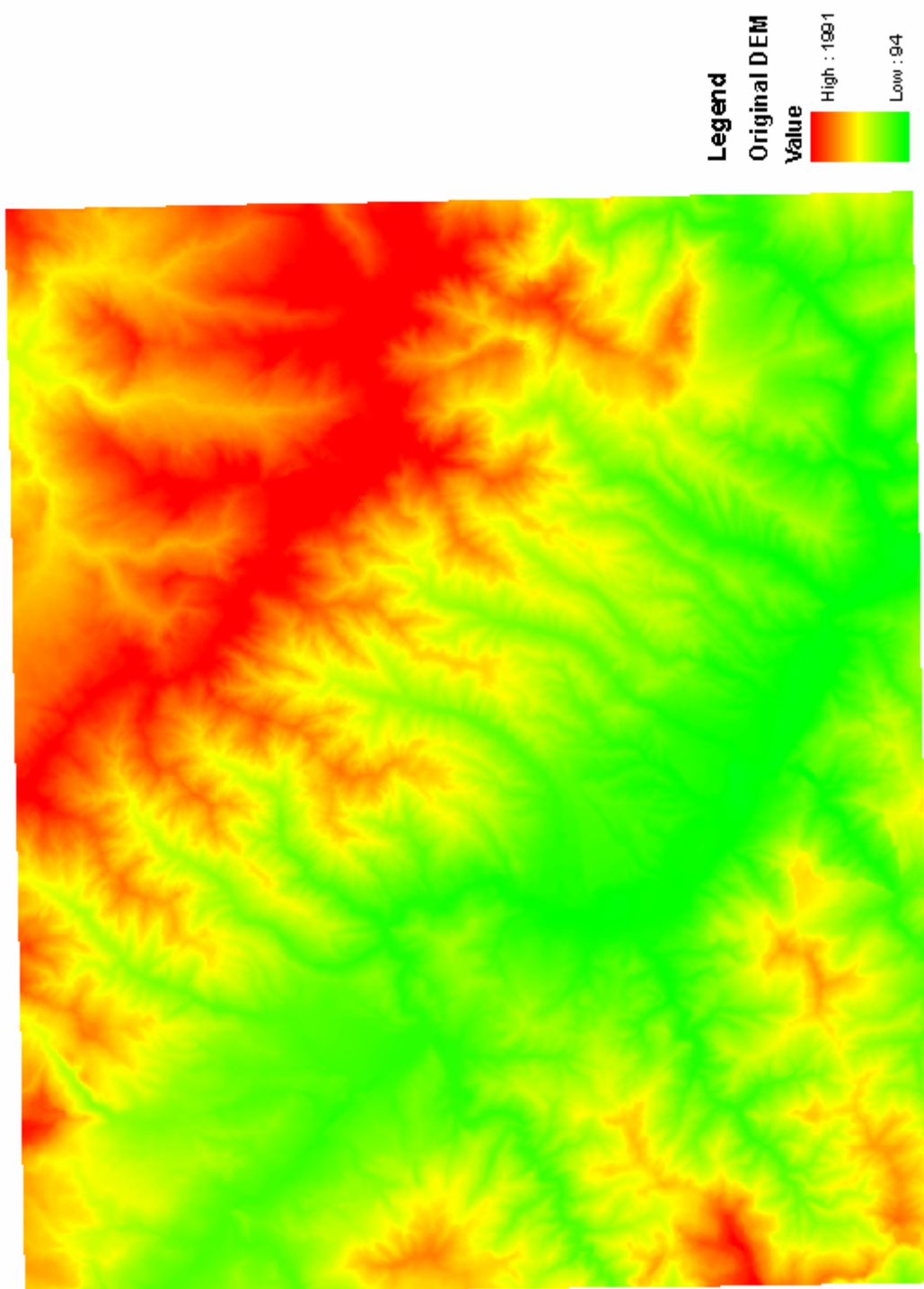


Figura 8.1: Mappa del DEM originale (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

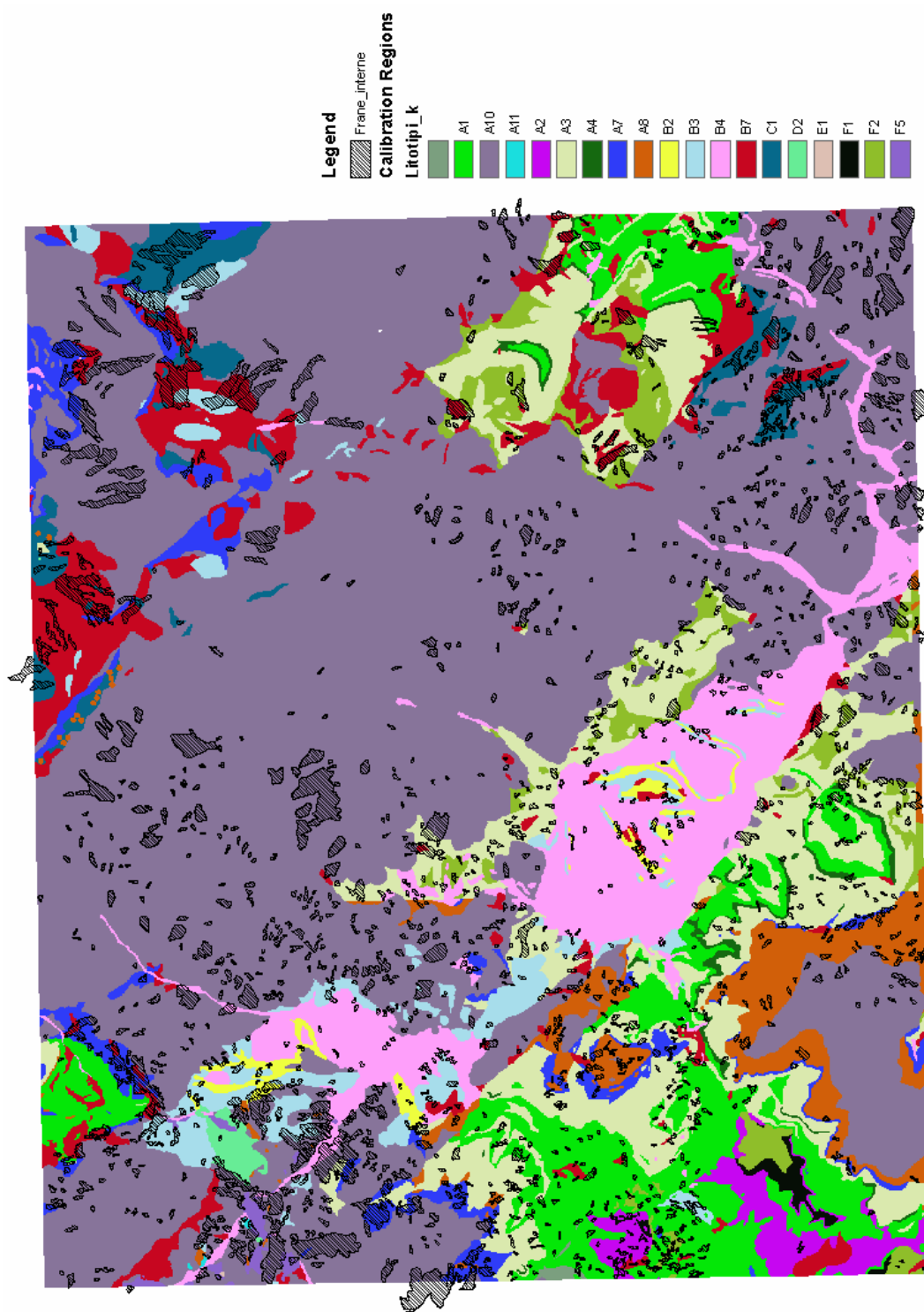


Figura 8.2: Mappa delle regioni di calibrazione (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

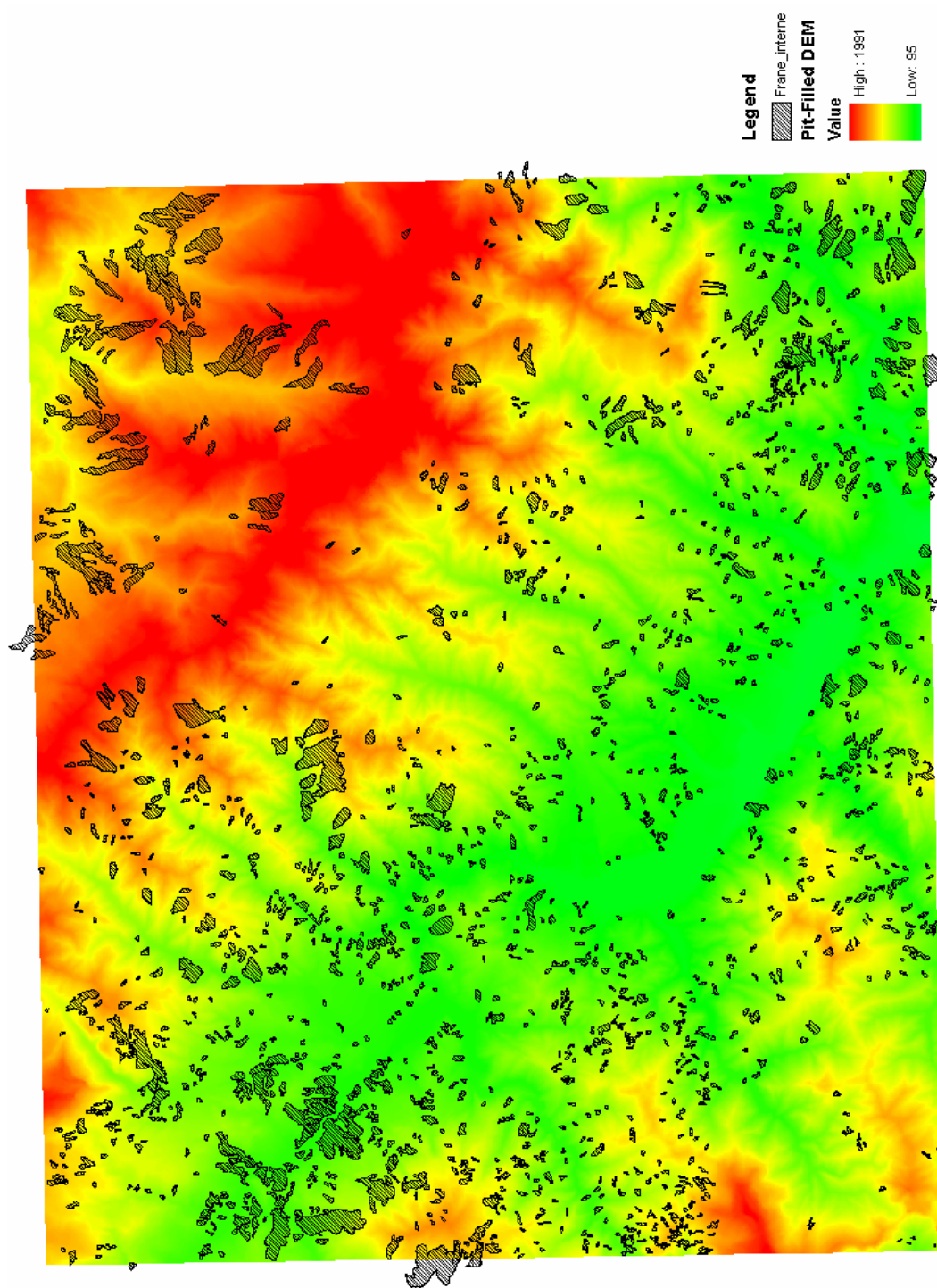


Figura 8.3: Mappa del DEM dopo le correzioni di riempimento delle cavità (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

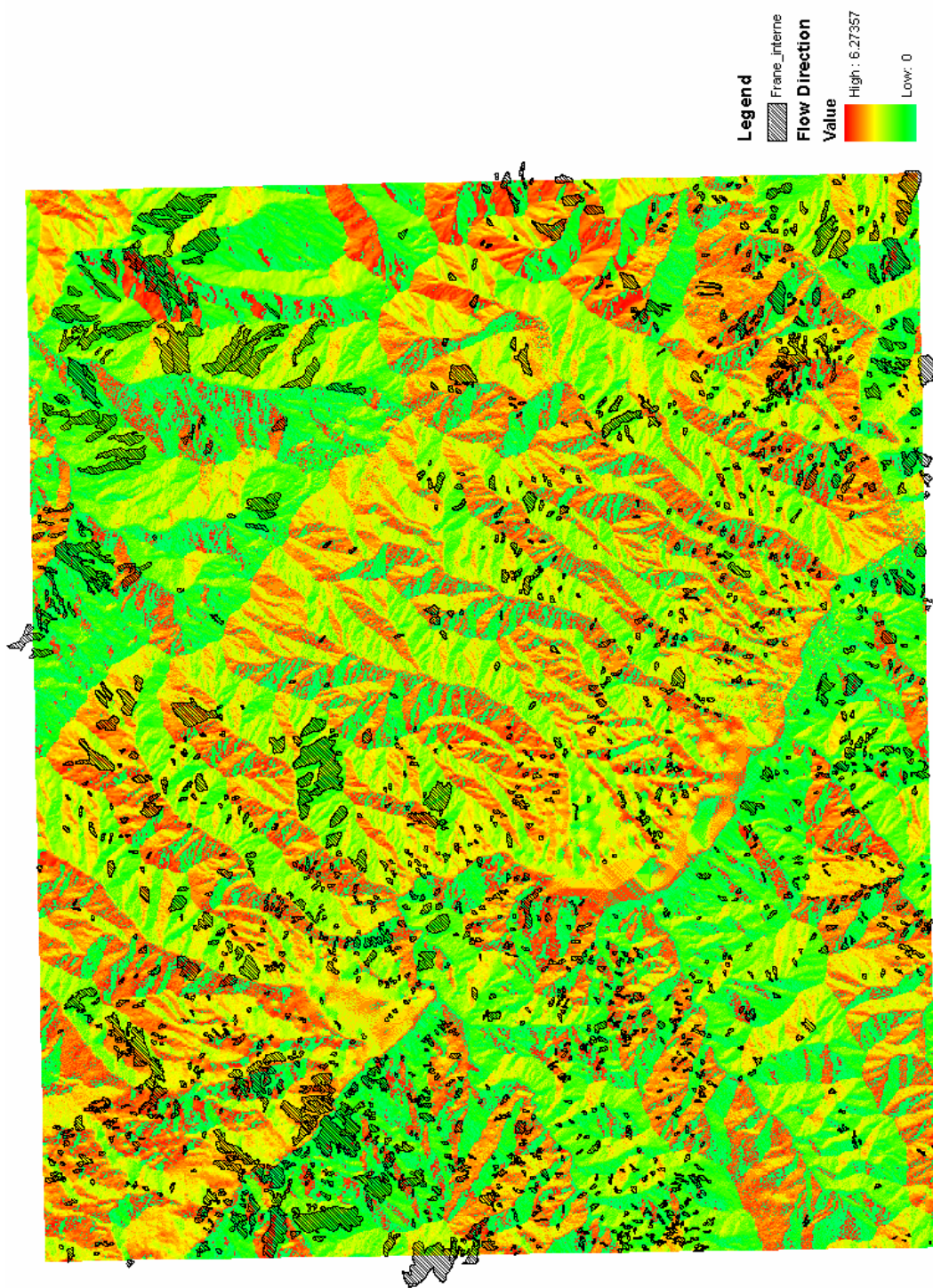


Figura 8.4: Mappa delle Direzioni di flusso (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

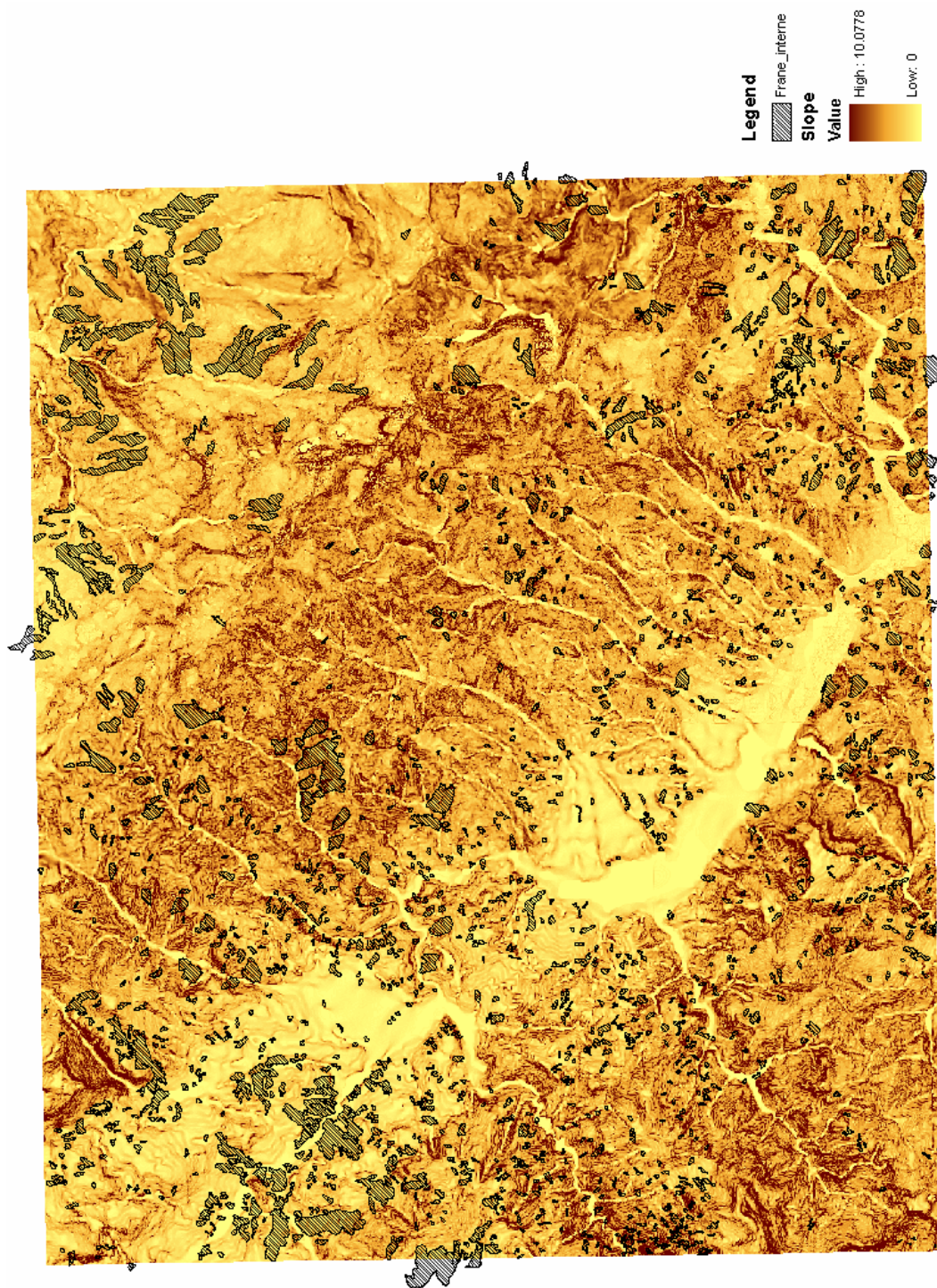


Figura 8.5: Mappa delle Pendenze (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

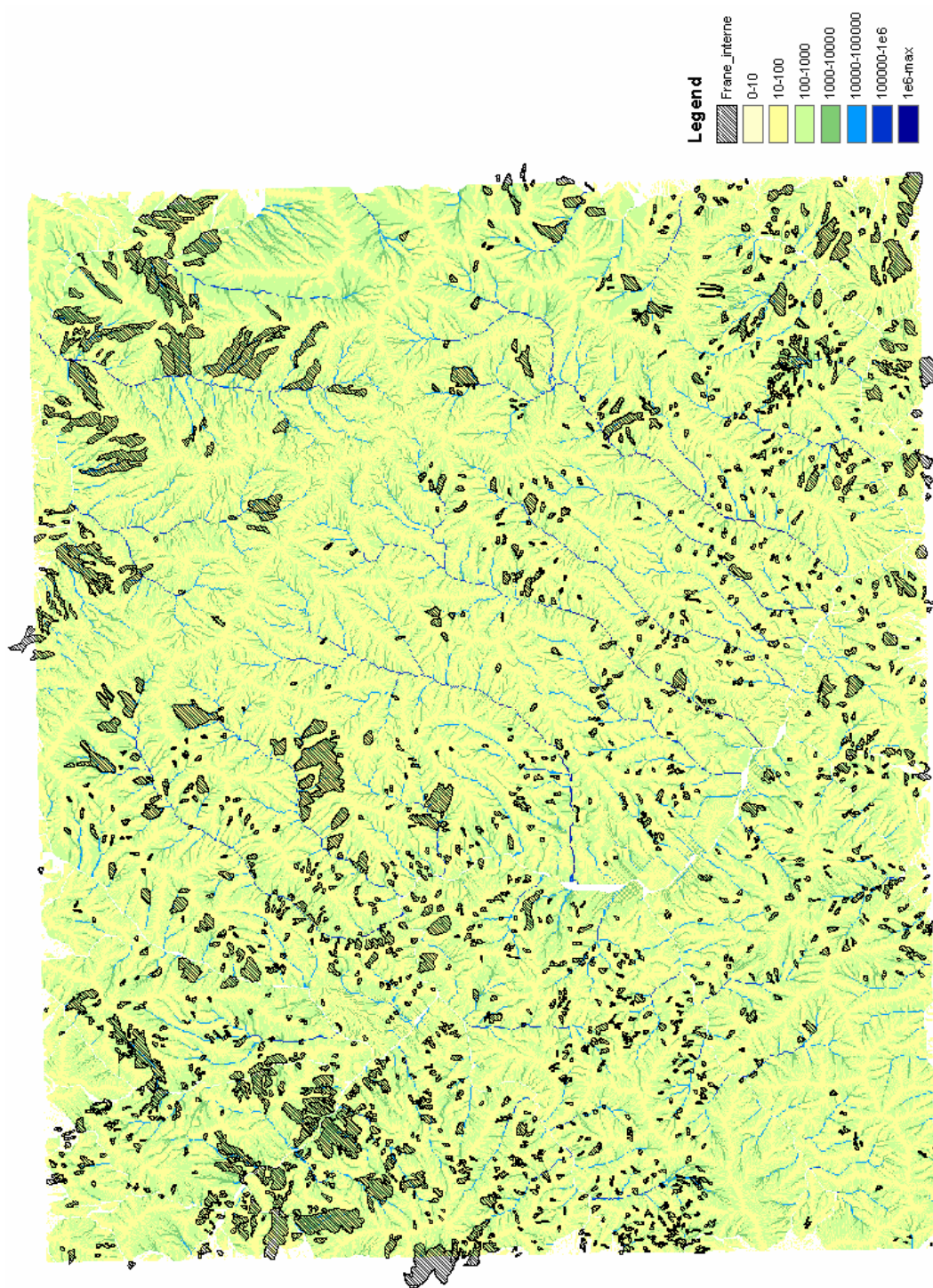


Figura 8.6: Mappa delle Aree contribuenti specifiche (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

8.3 LE ELABORAZIONI E I RISULTATI

SINMAP fornisce risultati sia in forma cartografica che in forma tabellare.

In Figura 8.7 si riporta la mappa dell'Indice di stabilità, mentre in Figura 8.8 la mappa della distribuzione dell'indice topografico di umidità.

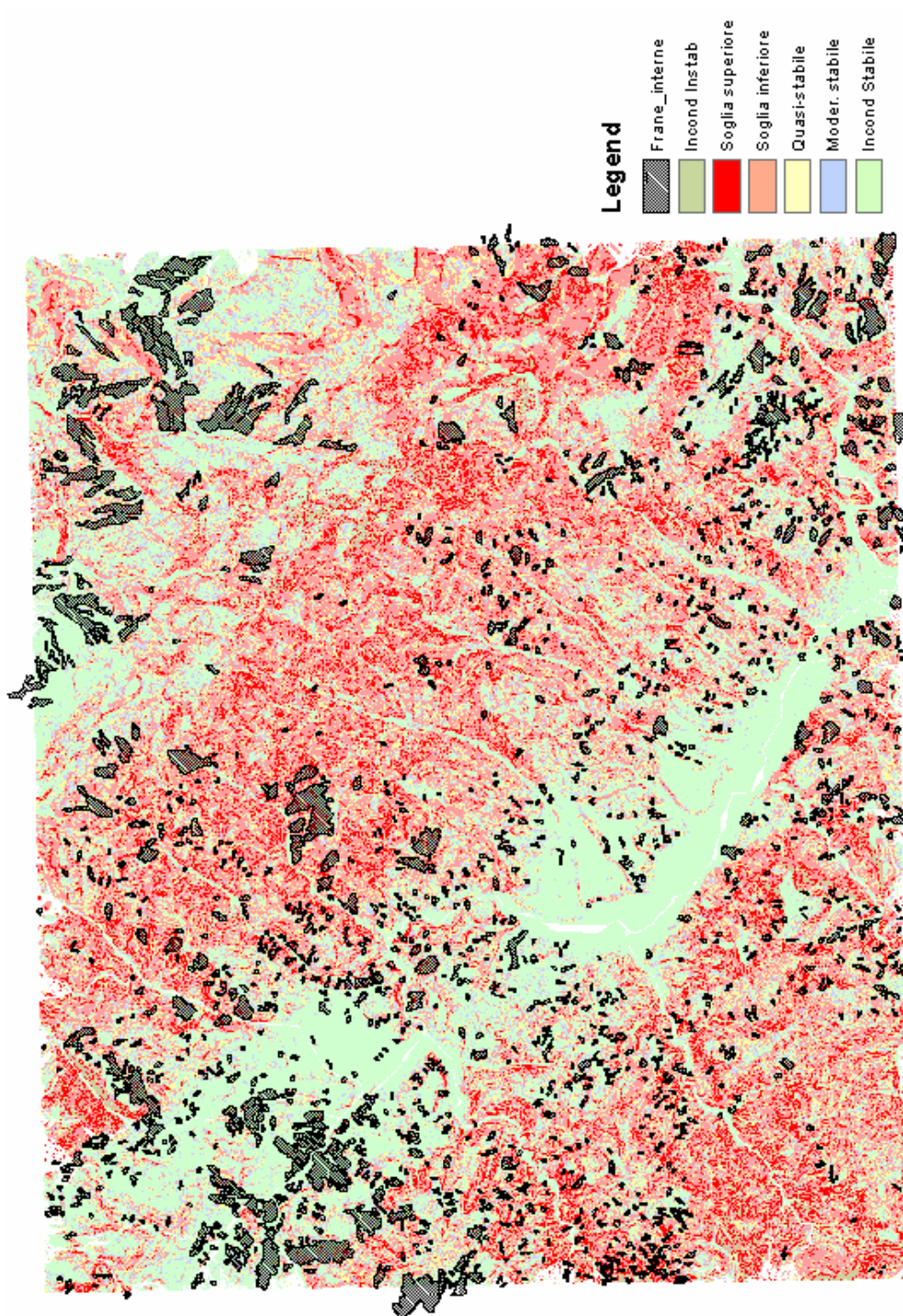


Figura 8.7: Mappa dell'Indice di Stabilità (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

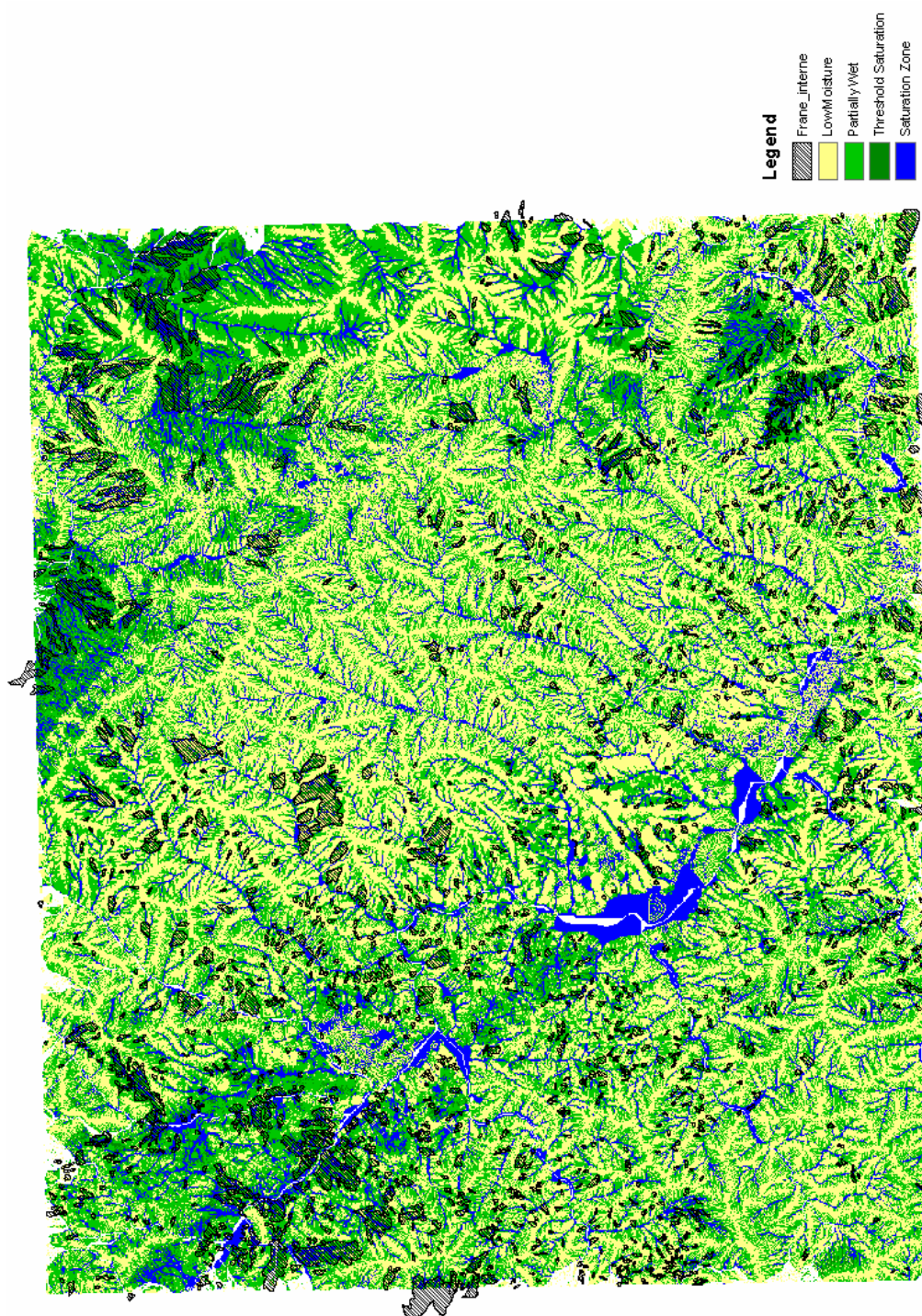


Figura 8.8: Mappa dell'Indice di saturazione (Adattamento da originale in scala 1:50.000).

In Tabella 8.1, Tabella 8.2, Tabella 8.3, Tabella 8.4, Tabella 8.5, Tabella 8.6 e Tabella 8.7, si riportano, rispettivamente, la distribuzione fra la classi di Indice di Stabilità, in funzione delle regioni di calibrazione, dell'estensione areale, in km^2 ed in percentuale, la

distribuzione numerica delle frane, la distribuzione percentuale degli scorrimenti, e la distribuzione della densità di frana.

Tabella 8.2: Distribuzione dell'area di studio [km²] fra la classi di Indice di Stabilità in funzione della litologia

Regione		Area(km ²)%	Totale	%	Incondizionatamente stabile	Moderatamente Stabile	Quasi-Stabile	Soglia inferiore	Soglia superiore	Incondizionatamente instabile
1	1	Altro	38.64	6.71	6.69	2.53	5.00	24.42	0.00	0.00
2	A1	calcari	317.98	55.20	84.26	32.37	51.40	149.95	0.00	0.00
3	A10	complessi pelitico-arenacei	0.06	0.01	0.04	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
4	A11	complessi calcareo-arenacei	6.21	1.08	0.59	0.32	0.68	4.63	0.00	0.00
5	A2	dolomie	59.09	10.26	14.77	5.10	8.50	30.72	0.00	0.00
6	A3	calcari marnosi	2.68	0.47	0.42	0.18	0.34	1.74	0.00	0.00
7	A4	diaspri	15.09	2.62	6.61	1.92	2.27	4.30	0.00	0.00
8	A7	marne	15.83	2.75	4.69	1.64	2.68	6.82	0.00	0.00
9	A8	conglomerati	3.53	0.61	2.74	0.25	0.25	0.29	0.00	0.00
10	B2	terreni prevalentemente sabbiosi	15.96	2.77	7.12	1.95	2.50	3.70	0.56	0.13
11	B3	terreni prevalentemente ghiaiosi	41.45	7.20	35.24	1.81	1.79	1.67	0.55	0.39
12	B4	terreni a granulometria mista	30.99	5.38	4.86	1.42	3.32	19.25	2.11	0.02
13	B7	terreni a granulometria indefinita	10.46	1.82	3.74	1.75	1.94	2.95	0.08	0.00
14	C1	argille caotiche	1.60	0.28	0.31	0.07	0.12	1.01	0.08	0.00
15	D2	Lave neutre	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	E1	rocce granitoidi	1.24	0.22	0.22	0.07	0.17	0.78	0.00	0.00
17	F1	filladi e micascisti	13.80	2.40	4.19	1.72	2.49	5.40	0.00	0.00
18	F2	gneiss	1.25	0.22	0.67	0.13	0.15	0.31	0.00	0.00
19	F5	serpentiniti	0.14	0.02	0.03	0.01	0.02	0.09	0.00	0.00
		TOTALE	576.02		177.19	53.22	83.64	258.04	3.39	0.54

Tabella 8.3: Distribuzione percentuale delle regioni di calibrazione fra la classi di Indice di Stabilità in funzione della litologia

Regione		% della Regione	Totale	Incondizionatamente stabile	Moderatamente Stabile	Quasi-Stabile	Soglia inferiore	Soglia superiore	Incondizionatamente instabile
1	1	Altro	100.00	17.31	6.54	12.95	63.20	0.00	0.00
2	A1	calcari	100.00	26.50	10.18	16.17	47.16	0.00	0.00
3	A10	complessi pelitico-arenacei	100.00	67.09	5.70	10.13	17.09	0.00	0.00
4	A11	complessi calcareo-arenacei	100.00	9.45	5.10	10.96	74.49	0.00	0.00
5	A2	dolomie	100.00	24.99	8.63	14.38	51.99	0.00	0.00
6	A3	calcari marnosi	100.00	15.78	6.53	12.70	64.99	0.00	0.00
7	A4	diaspri	100.00	43.78	12.71	15.03	28.48	0.00	0.00
8	A7	marne	100.00	29.65	10.34	16.90	43.11	0.00	0.00
9	A8	conglomerati	100.00	77.57	7.07	7.19	8.17	0.00	0.00
10	B2	terreni prevalentemente sabbiosi	100.00	44.61	12.19	15.68	23.16	3.54	0.82
11	B3	terreni prevalentemente ghiaiosi	100.00	85.01	4.37	4.31	4.03	1.34	0.94
12	B4	terreni a granulometria mista	100.00	15.69	4.58	10.73	62.12	6.82	0.07
13	B7	terreni a granulometria indefinita	100.00	35.78	16.73	18.52	28.20	0.76	0.00
14	C1	argille caotiche	100.00	19.66	4.33	7.78	63.06	5.18	0.00
15	D2	Lave neutre	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	E1	rocce granitoidi	100.00	17.43	5.81	14.07	62.69	0.00	0.00
17	F1	filladi e micascisti	100.00	30.38	12.48	18.01	39.13	0.00	0.00
18	F2	gneiss	100.00	53.50	10.00	12.04	24.47	0.00	0.00
19	F5	serpentiniti	100.00	18.33	4.72	12.78	64.17	0.00	0.00

Tabella 8.4: Distribuzione numerica delle frane fra la classi di Indice di Stabilità in funzione della litologia

Regione		N° FRANE	Totale	Incondizionatamente stabile	Moderatamente Stabile	Quasi-Stabile	Soglia inferiore	Soglia superiore	Incondizionatamente instabile
1	1	Altro	122	13	16	22	71	0	0
2	A1	calcari	743	227	84	130	302	0	0
3	A10	complessi pelitico-arenacei	2	0	0	1	1	0	0
4	A11	complessi calcareo-arenacei	17	2	3	2	10	0	0
5	A2	dolomie	206	61	20	43	82	0	0
6	A3	calcari marnosi	4	0	1	0	3	0	0
7	A4	diaspri	57	30	10	8	9	0	0
8	A7	marne	82	31	6	13	32	0	0
9	A8	conglomerati	11	10	0	0	1	0	0
10	B2	terreni prevalentemente sabbiosi	73	33	10	6	17	6	1
11	B3	terreni prevalentemente ghiaiosi	81	42	8	15	12	2	2
12	B4	terreni a granulometria mista	72	8	5	4	50	5	0
13	B7	terreni a granulometria indefinita	44	22	6	8	8	0	0
14	C1	argille caotiche	3	1	0	0	2	0	0
15	D2	Lave neutre	0	0	0	0	0	0	0
16	E1	rocce granitoidi	1	0	0	0	1	0	0
17	F1	filladi e micascisti	50	17	11	7	15	0	0
18	F2	gneiss	8	1	1	4	2	0	0
19	F5	serpentiniti	0	0	0	0	0	0	0

Tabella 8.5: Distribuzione percentuale di scorrimenti fra la classi di Indice di Stabilità in funzione della litologia

Regione		% SCORRIMENTI	Totale	Incondizionatamente stabile	Moderatamente Stabile	Quasi-Stabile	Soglia inferiore	Soglia superiore	Incondizionatamente instabile
1	1	Altro	7.60	0.81	1.00	1.37	4.42	0.00	0.00
2	A1	calcari	46.26	14.13	5.23	8.09	18.80	0.00	0.00
3	A10	complessi pelitico-arenacei	0.12	0.00	0.00	0.06	0.06	0.00	0.00
4	A11	complessi calcareo-arenacei	1.06	0.12	0.19	0.12	0.62	0.00	0.00
5	A2	dolomie	12.83	3.80	1.25	2.68	5.11	0.00	0.00
6	A3	calcari marnosi	0.25	0.00	0.06	0.00	0.19	0.00	0.00
7	A4	diaspri	3.55	1.87	0.62	0.50	0.56	0.00	0.00
8	A7	marne	5.11	1.93	0.37	0.81	1.99	0.00	0.00
9	A8	conglomerati	0.68	0.62	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00
10	B2	terreni prevalentemente sabbiosi	4.55	2.05	0.62	0.37	1.06	0.37	0.06
11	B3	terreni prevalentemente ghiaiosi	5.04	2.62	0.50	0.93	0.75	0.12	0.12
12	B4	terreni a granulometria mista	4.48	0.50	0.31	0.25	3.11	0.31	0.00
13	B7	terreni a granulometria indefinita	2.74	1.37	0.37	0.50	0.50	0.00	0.00
14	C1	argille caotiche	0.19	0.06	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00
15	D2	Lave neutre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	E1	rocce granitoidi	0.06	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00
17	F1	filladi e micascisti	3.11	1.06	0.68	0.44	0.93	0.00	0.00
18	F2	gneiss	0.50	0.06	0.06	0.25	0.12	0.00	0.00
19	F5	serpentiniti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabella 8.6: Distribuzione della densità di frana fra la classi di Indice di Stabilità in funzione della litologia

Regione		Densità di frana(n°/km ²)	Totale	Incondizionatamente stabile	Moderatamente Stabile	Quasi-Stabile	Soglia inferiore	Soglia superiore	Incondizionatamente instabile
1	1	Altro	3.16	0.34	0.41	0.57	1.84	0.00	0.00
2	A1	calcari	2.34	0.71	0.26	0.41	0.95	0.00	0.00
3	A10	complessi pelitico-arenacei	31.65	0.00	0.00	15.82	15.82	0.00	0.00
4	A11	complessi calcareo-arenacei	2.74	0.32	0.48	0.32	1.61	0.00	0.00
5	A2	dolomie	3.49	1.03	0.34	0.73	1.39	0.00	0.00
6	A3	calcari marnosi	1.49	0.00	0.37	0.00	1.12	0.00	0.00
7	A4	diaspri	3.78	1.99	0.66	0.53	0.60	0.00	0.00
8	A7	marne	5.18	1.96	0.38	0.82	2.02	0.00	0.00
9	A8	conglomerati	3.12	2.83	0.00	0.00	0.28	0.00	0.00
10	B2	terreni prevalentemente sabbiosi	4.57	2.07	0.63	0.38	1.07	0.38	0.06
11	B3	terreni prevalentemente ghiaiosi	1.95	1.01	0.19	0.36	0.29	0.05	0.05
12	B4	terreni a granulometria mista	2.32	0.26	0.16	0.13	1.61	0.16	0.00
13	B7	terreni a granulometria indefinita	4.21	2.10	0.57	0.76	0.76	0.00	0.00
14	C1	argille caotiche	1.88	0.63	0.00	0.00	1.25	0.00	0.00
15	D2	Lave neutre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	E1	rocce granitoidi	0.81	0.00	0.00	0.00	0.81	0.00	0.00
17	F1	filladi e micascisti	3.62	1.23	0.80	0.51	1.09	0.00	0.00
18	F2	gneiss	6.39	0.80	0.80	3.19	1.60	0.00	0.00
19	F5	serpentiniti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

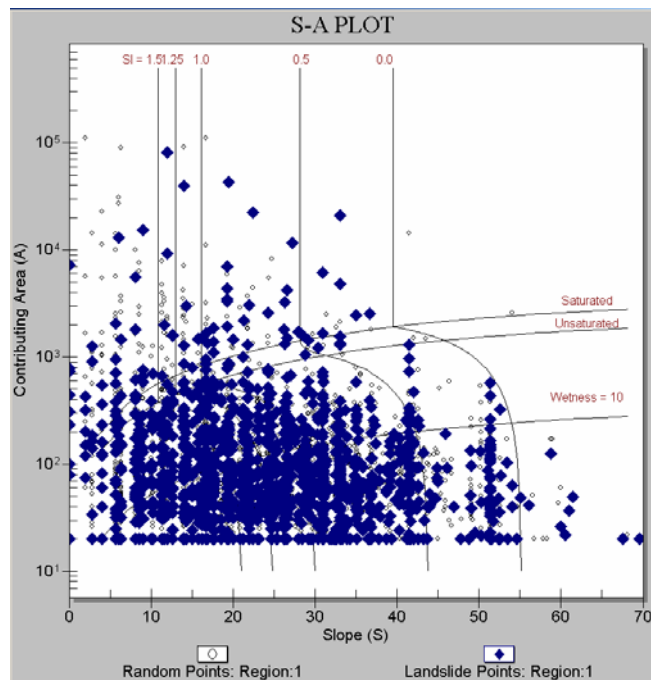


Figura 8.9: Diagramma “SA”.

In Figura 8.9 si riporta il diagramma “SA” prodotto da SINMAP; in Tabella 8.7 si riporta la distribuzione dell’area instabile fra le classi dell’Indice di Stabilità automaticamente individuate da SINMAP, dopo l’applicazione del filtro circolare di lato 5 celle.

Tabella 8.7: Distribuzione dell’area instabile fra la classi di Indice di Stabilità in funzione della litologia

Stability Index	Pixel totali	Pixel STABILI	Pixel INSTABILI	PERCENT INST	PERCENT INST sull'area totale	Distribuzione % area instabile
Incond Instab	34684	32539	2145	6.18%	0.14%	1.96%
Soglia superiore	85608	78118	7490	8.75%	0.50%	6.84%
Soglia Inferiore	1235136	1146302	88834	7.19%	5.96%	81.13%
Quasi-stabile	48164	42173	5991	12.44%	0.40%	5.47%
Moder.Stabile	22617	19979	2638	11.66%	0.18%	2.41%
Incond Stab	64362	61958	2404	3.74%	0.16%	2.20%

Infine, in Figura 8.10 si riporta l’istogramma della distribuzione dell’area instabile all’interno delle varie classi di Indice di Stabilità.

Dallo studio statistico dei risultati ottenuti si può osservare che l’81,13% dell’area instabile risulta classificata in Soglia Inferiore e comunque quasi il 90% di essa ha Indice di

Stabilità inferiore a 1. Questo è certamente un ottimo risultato, ma andrebbe approfondito meglio, aumentando il dettaglio delle regioni di classificazione e tenendo conto del fatto che nella suddivisione delle regioni scelta nella presente elaborazione non si è tenuto conto del fatto che molto spesso, sul basamento roccioso si trovano delle coltri detritiche con alta propensione a frane.

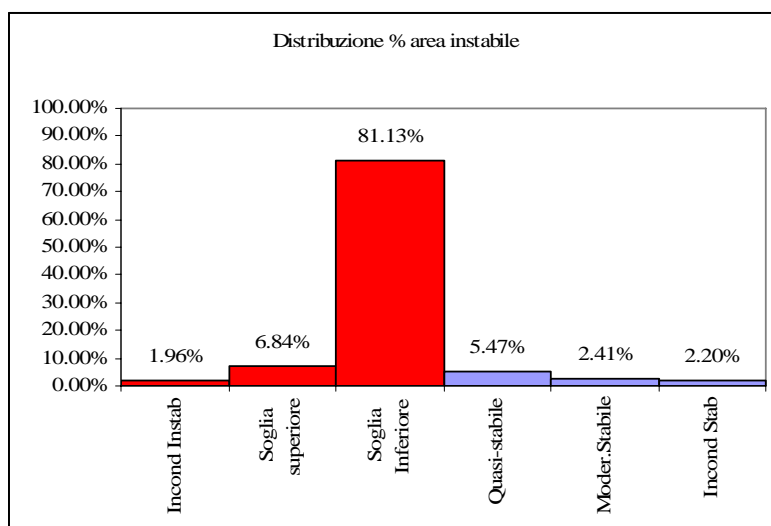


Figura 8.10: Istogramma della distribuzione dell'area instabile all'interno delle varie classi di Indice di Stabilità.

8.3.1 INDICE DI EFFICIENZA

Anche in questo caso si vuole valutare l'efficienza di questo tipo di classificazione nell'identificazione delle aree con una certa pericolosità da frana.

Si utilizza la tecnica della **MATRICE DEI CASI CORRETTAMENTE CLASSIFICATI**.
L'Indice di efficienza del modello si calcola così:

$$I_{eff} = \frac{(1) + (2)}{(1) + (2) + (3) + (4)}$$

In cui:

- (1) unità territoriali predette come stabili e prive di depositi franosi;
 - unità territoriali predette come instabili e interessate da corpi di frana;
 - unità territoriali predette come instabili ma prive di depositi franosi;
 - unità territoriali predette come stabili e interessate da corpi di frana.

In questo caso:

Tabella 8.8: Distribuzione dei pixel fra le varie classi di indice di stabilità in funzione del tipo di filtro applicato

		Incondizionatamente instabile	Soglia Superiore	Soglia Inferiore	Quasi-Stabile	Moderatamente Stabile	Incondizionatamente stabile	TOTALE
STABILITY INDEX		21293	138173	490147	198457	135237	456753	1440060
FILTRO1	Min ·3	206203	554126	475661	83575	47505	112898	1479968
FILTRO2	Min ·5	372622	623580	352764	49578	28296	64104	1490944
FILTRO3	Media ·3	4	1928	150708	502611	236271	588446	1479968
FILTRO4	Media ·5	4	599	86315	478234	275334	650085	1490571
FILTRO5	Min ...3	96936	391090	560734	132771	76643	208288	1466462
FILTRO6	Min ...5	186775	530568	492496	90785	51638	124290	1476552
FILTRO7	Media ...3	23	4252	273833	483440	186095	518803	1466446
FILTRO8	Media ...5	170	61832	411426	266672	180093	556277	1476470

Tabella 8.9: Distribuzione dei pixel stabili fra le varie classi di indice di stabilità in funzione del tipo di filtro applicato

		Incondizionatamente instabile	Soglia Superiore	Soglia Inferiore	Quasi-Stabile	Moderatamente Stabile	Incondizionatamente stabile	TOTALE
STABILITY INDEX		20788	132475	460745	182493	121414	415766	1333681
FILTRO1	Min ·3	198846	523596	428870	72361	41130	105959	1370762
FILTRO2	Min ·5	357329	583128	311247	42383	25039	61943	1381069
FILTRO3	Media ·3	4	1789	141078	471829	216191	539871	1370762
FILTRO4	Media ·5	4	570	80460	450967	252513	596555	1381069
FILTRO5	Min ...3	93930	372269	516021	117702	66774	191510	1358206
FILTRO6	Min ...5	180237	502024	445529	78917	44746	116197	1367650
FILTRO7	Media ...3	23	3936	257445	451755	169087	475960	1358206
FILTRO8	Media ...5	168	60277	392194	246569	162586	505856	1367650

Tabella 8.10: Distribuzione dei pixel instabili fra le varie classi di indice di stabilità in funzione del tipo di filtro applicato

		Incondizionatamente instabile	Soglia Superiore	Soglia Inferiore	Quasi-Stabile	Moderatamente Stabile	Incondizionatamente stabile	TOTALE
STABILITY INDEX		505	5698	29402	15964	13823	40987	106379
FILTRO1	Min ·3	7342	30504	46722	11185	6364	6920	109037
FILTRO2	Min ·5	15243	40345	41360	7158	3251	2145	109502
FILTRO3	Media ·3	0	129	9564	30745	20050	48549	109037
FILTRO4	Media ·5	0	29	5855	27267	22821	53530	109502
FILTRO5	Min ...3	3001	18818	44712	15065	9866	16778	108240
FILTRO6	Min ...5	6524	28521	46939	11854	6890	8092	108820
FILTRO7	Media ...3	0	316	16388	31685	17008	42843	108240
FILTRO8	Media ...5	2	1555	19232	20103	17507	50421	108820

Tabella 8.11: Calcolo dell'Indice di Efficienza per ciascuna classificazione

		STAB_NO FRANA	INSTAB_FRANA	INSTAB_NO FRANA	STAB_FRANA			
LEGENDA		(1)	(2)	(3)	(4)	(1)+(2)	(1)+(2)+ (3)+(4)	PM
STABILITY INDEX		719673	35605	614008	70774	755278	1440060	52.45%
FILTRO1	Min ·3	219450	84568	1151312	24469	304018	1479799	20.54%
FILTRO2	Min ·5	129365	96948	1251704	12554	226313	1490571	15.18%
FILTRO3	Media ·3	1227891	9693	142871	99344	1237584	1479799	83.63%
FILTRO4	Media ·5	1300035	5884	81034	103618	1305919	1490571	87.61%
FILTRO5	Min ...3	375986	66531	982220	41709	442517	1466446	30.18%
FILTRO6	Min ...5	239860	81984	1127790	26836	321844	1476470	21.80%
FILTRO7	Media ...3	1096802	16704	261404	91536	1113506	1466446	75.93%
FILTRO8	Media ...5	915011	20789	452639	88031	935800	1476470	63.38%

Nella Tabella 8.11 si può notare che il FILTRO 4 è quello che ha il miglior indice di efficienza.

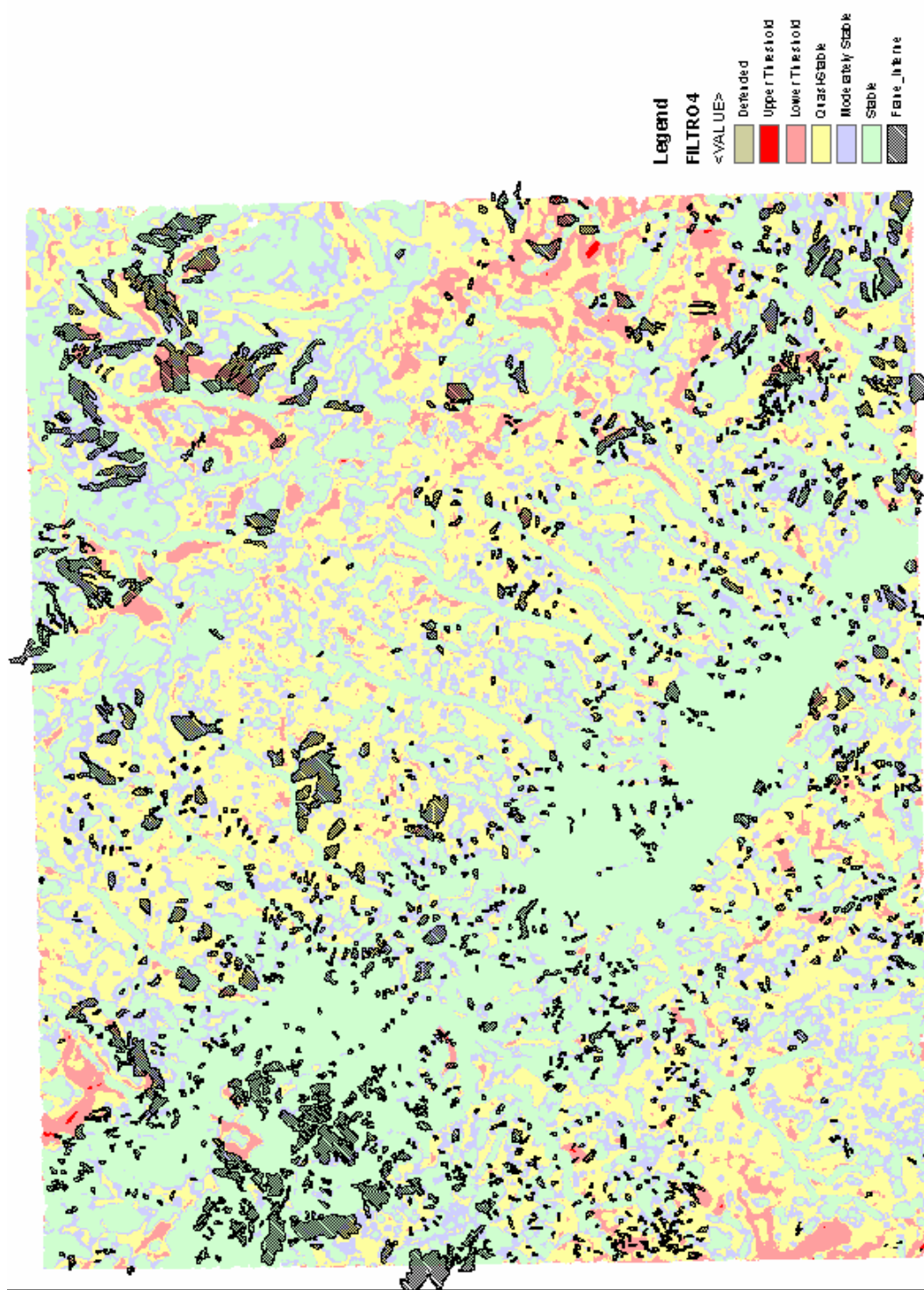


Figura 8.11: Mappa di pericolosità ottenuta con l'analisi deterministica.

9 CONCLUSIONI

In questo lavoro sono state applicate tecniche GIS per la valutazione della *pericolosità geologica connessa all'instabilità dei versanti*.

È stata progettata una metodologia statistica, basata sul metodo delle Unità a Condizioni Uniche, da utilizzare per dedurre informazioni di pericolosità dall'analisi di dati disponibili per l'intera copertura del territorio nazionale, come la base topografica IGM, il DTM 20*20 dell'IGM in scala 1:25.000, la Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000, la Carta Litologica alla stessa scala, la Carta di Uso del Suolo "Corine Land Cover" in scala 1:100.000, la carta dei Bacini Idrografici IGM in scala 1:25.000, l'inventario dei fenomeni franosi Italiani IFFI in scala 1:25.000, senza richiedere ulteriori indagini ad hoc.

La metodologia statistica è stata applicata per la realizzazione di Carte Tematiche di "Pericolosità geologica connessa all'instabilità dei versanti", nell'area del Foglio 250, Castelnuovo di Garfagnana (scala 1:50.000).

Nella stessa area-studio del Foglio 250, Castelnuovo di Garfagnana (scala 1:50.000) è stata applicata anche una tecnica deterministica, effettuando calcoli di stabilità a partire da parametri geomorfologici, geotecnici e climatici con l'ausilio del software, SINMAP.

Dalle analisi condotte emerge che, in generale, l'utilizzo di metodologie GIS consente di ottenere, con una certa efficienza e rapidità, tutta una serie di elaborati utili alla definizione della propensione al dissesto di un'area.

Prima di procedere alle analisi si è svolta una fase di preparazione dei layer informativi di input e di georeferenziazione delle informazioni secondo la proiezione UTM, fuso n°32, con il sistema di coordinate ED 1950.

Le analisi statistiche sono state svolte con il metodo dell'analisi statistica multivariata (metodo delle UCU, ad uno, a tre e a cinque parametri di input) e con l'analisi morfometrica (metodo del TRMI).

Si è analizzata la relazione fra "Uso del Suolo" e "Franosità". Si è osservato che la maggior parte dell'area in frana ricade in superfici agricole utilizzate, in particolare in colture permanenti di frutteti e frutti minori.

Si sono costruite le UCU3 dall'incrocio fra Litologia, Pendenza e Uso del Suolo e si è osservato che in corrispondenza di alcune combinazioni si hanno altissime percentuali in frana.

Si è calcolato l'indice morfometrico TRMI (Topographic Relative Moisture Index) (Parker, 1982) mediante il Model Builder di ArcToolbox, e tale indice è stato poi preso in considerazione nella costruzione delle UCU5, per le quali sono stati incrociati gli strati informativi Distanza dalle aste fluviali, TRMI, Litologia, Pendenza e uso del Suolo.

Alla mappa ottenuta col metodo delle UCU5 sono state applicate otto funzioni focali di filtro, prendendo il valore massimo o il valore di moda, per attenuare gli eventuali picchi o pixel isolati, ed infine è stato calcolato un indice di efficienza delle classificazione mettendo a confronto le aree classificate a pericolosità alta e molto alta con le aree che risultano effettivamente in frana secondo l'archivio IFFI.

Il FILTRO 4, di forma circolare e raggio pari a 5 celle, nel quale si prende la moda fra i valori contenuti, ha ottenuto il più alto indice di efficienza ($I_{eff} = 76,44\%$) e si è messo in evidenza che funzionano meglio i filtri in cui all'interno dell'area focalizzata si prende la moda dei valori.

L'analisi deterministica è stata condotta con l'ausilio del software SINMAP e alla mappa dell'indice di stabilità ottenuta sono state applicate otto funzioni focali di filtro in cui si è scelto di prendere i valori minimi o i valori medi.

Anche questa volta il FILTRO 4, di forma circolare e raggio pari a 5 celle, nel quale si prende la moda fra i valori contenuti, ha ottenuto il più alto indice di efficienza ($I_{eff} = 87,61\%$) e si è messo in evidenza che funzionano meglio i filtri in cui all'interno dell'area focalizzata si prende il valor medio.

Teoricamente, l'uso di modelli, fisicamente basati semplificati, come SHALSTAB, SINMAP, vincolati da DEM sufficientemente accurati e calibrati da set di dati ricavati da ricerche storiche e monitoraggio, permetterebbe di elaborare mappe della suscettività (propensione) al dissesto superficiale per frana molto più significative e utili dei semplici inventari del dissesto, qui utilizzati per la loro calibrazione. Infatti, se il set dei dati di input è sufficientemente affidabile e dettagliato, i modelli potrebbero individuare aree idonee per il franamento superficiale nel prossimo futuro.

La minore attendibilità dei risultati ottenuti nell'applicazione deterministica del presente lavoro è comunque compensata dal fatto che i dati di input utilizzati sono disponibili per l'intera copertura nazionale a costo zero.

Modelli più complessi per la previsione spaziale e temporale in tempo reale del dissesto sono ancora in fase sperimentale, e la loro utilizzazione non è prevista prima di alcuni anni.

Ma forse il risultato più stupefacente è il fatto che gli ultramoderni e futuribili modelli numerici fisicamente basati stanno rivitalizzando idee e modelli concettuali elaborati dai geomorfologi dell'inizio del '900, i quali ponevano non la singola frana, ma il versante e il bacino idrografico e il loro utilizzo al centro dell'attenzione.

Considerando che la durata di un documento di pianificazione regionale-infraregionale dura un decennio (ma i principi informativi possono esser confermati più volte), e che in tale periodo può cambiare significativamente l'uso del suolo sotto la spinta di mutate esigenze di economia agraria, si ribadisce che un modello, per quanto sofisticato, non è sufficiente a produrre elaborati di pianificazione credibili se gli archivi del dissesto non sono di buona qualità oltretutto continuamente aggiornati.

BIBLIOGRAFIA

- Akinci A., Lombardi A. M., Malagnini L., Mueller C. (2004). - Seismic Hazard estimate in the Alps and Apennines (Italy) using smoothed historical seismicity and regionalized predictive ground - motion relationship. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. Vol. 45, n° 4, pp. 285 - 304, December 2004.
- Alessandri C., Balzani M., Zaltron N. (2005) - *Il laser scanner 3D per il rilievo e il monitoraggio del territorio* Secondo Forum Nazionale "Rischio di frana e assetto idrogeologico nei territori collinari e montani. Questioni, metodi, esperienze a confronto. - A cura di Erminio M. Ferrucci e Oscar Zani. Maggioli Editore.
- Amanti M., Cara P., Pecci M., Ventura R. (1996). Preliminary results in the field control of a new proposal of landslide classification for the prevention of natural risks in the experimental Serchio River Basin (Tuscany, Italy); *Atti Convegno Internazionale Alba 96 - La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche: il contributo della ricerca scientifica - Consiglio Nazionale delle Ricerche*, Vol. 1, pp. 223 - 229.
- Annunzianti A., Mazzanti B., Focardi A., Focardi P. (2002) - Individuazione di soglie critiche per l'attivazione di sistemi di allerta per rischio da debris flow - *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, vol. 1/1, pp. 117-124.
- Bartolini C., Bernini M., Carloni G.C., Castaldini D., Costantini A., Federici P.R., Francavilla F., Gasperi G., Lazzaretto a., Marchetti G., Mozzanti R., Papani G., Pranzini G., Rau A., Sandrelli F. , Vercesi P.L. (1983); *Carta neotettonica dell'Appennino settentrionale*. Note illustrative. *Boll. Soc. Geol. It.*, 101, 1982, pp. 523-549.
- Beven, K. J., Kirkby M. J. (1979), "A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology," *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1): 43-69.
- Boccaletti M., Decandia F.A., Gasperi G., Gelmini R., Lazzaretto A. (1981) *Evoluzione dell'Appennino settentrionale secondo un nuovo modello strutturale*. *Mem. Soc. Geol. It.* 21 (1980) pp.359-373
- Boccaletti M. & Coli M. (1985) *La tettonica della Toscana: assetto ed evoluzione*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 25,1983, p.51-62.
- Boschi E.(1997). *Catalogo dei forti terremoti italiani*, (CFTI), I.N.G. Roma.
- Burrough P. A. (1986) - *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. - Clarendon Press, Oxford.
- BURT n. 10 del 9-3-2005 - *DELIBERAZIONE 1 febbraio 2005, n. 20 Approvazione del piano di assetto idrogeologico per il bacino regionale pilota fiume Serchio*.
- Calosi E., Luzi L. (2002) - GIS e cartografia digitale: progetto sperimentale per l'informatizzazione di carte geologiche alla scala 1:2.000 per le aree della Garfagnana e Lunigiana. *Rivista Italiana di Geotecnica*. XXXVI, n. 3 , pp. 33- 41.

- Cancelli A., D'Amato Avanzi G., Pochini A., Puccinelli A. (2002) – “Caratterizzazione geologica e litologico-tecnica delle piane del Serchio e della Turrite Secca in prossimità di Castelnuovo Garfagnana (Lucca)”- Rivista Italiana di Geotecnica. XXXVI, n. 3 , pp. 17- 32.
- Carrara A. (1988) – Drainage and divide networks derived from high-fidelity digital terrain models. In Chung C.F. et al. (Editors), Quantitative analysis for mineral and energy resources. NATO – ASI Series, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, pp. 581–597.
- Carrara A. (1992) – Landslide hazard assessment. – Proc. Int. Symp. Inter. Sensores Remotos y Sistema de Inform. Geogr. Para el Studio de Riescos Natur. March 10-12, 1992, Bogotá, pp. 329–355.
- Carrara A. (1995), GIS technology in mapping landside hazard, In: A. Carrara and F. Guzzetti (eds), Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 135–176.
- Cascini L., Cuomo S., Sorbino G. (2005). “Flow-like mass movements in pyroclastic soils: remarks on the modelling of triggering mechanism”. Rivista Italiana di Geotecnica, XXXIX, n. 4, pp. 11-31.
- Castaldini D., Genevois R., Panizza M., Puccinelli A., Berti M. & Simoni A. (1998) - *An integrated approach for analysing earthquake-induced surface effects: a case study from the northern Apennines, Italy: Journ. Geodynamics*, 26, 4 13-441
- Chen R., Chameau J. L. (1983) Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes, *Geotechnique* 33, 31–40.
- Coli M. (1992). Appennino Tosco - Emiliano. Guide Geologiche Regionali. Be - Ma Editrice.
- Cruden D.M., Varnes D.J. (1993). Landslides: Investigation and Mitigation. Capitolo 3 ‘Landslides Types and Processes’ - Transportation Research Board, National Academy of Sciences. Washington: Report p. 53.
- Cruden D.M., Varnes D.J. (1996). ‘Landslides Types and Processes’ In Turner AK , Schuster R.L. (eds.) “Landslides: Investigation and Mitigation”. Special Report n. 247. Transportation Research Board, National Research Council. Washington.
- D'Amato Avanzi G., Pieroni A. & Puccinelli A. (1995) - *La pericolosità da frana della Garfagnana (Lucca) nell'area compresa tra S. Romano e Pontecosì*. Geol. Appi. e Idrogeol., Bari, 30 (1), 225-240.
- D'Amato Avanzi G., Pieroni A. & Puccinelli A. (1997) - *Studio dei movimenti gravitativi di S. Romano in Garfagnana (Vai di Serchio - Lucca)*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 20, 61-70.
- D'Amato Avanzi G., Pieroni A. & Puccinelli A. (1997) - *Il rischio di frana in Vai di Serchio: stima della pericolosità in aree maggiormente vulnerate*. Atti Conv. Lincei, 134, 171-177.
- D'Amato Avanzi G., Pieroni A. & Puccinelli A. (1999) - *Valutazione della pericolosità delle frane in aree a maggior vulnerabilità del bacino del F. Serchio*. Atti Conv. Lincei, 154, 175-181.
- D'Amato Avanzi G., Pieroni A. & Puccinelli A. (2003) - Determination of the stability conditions of a rock slope using an integrated geological, geomorphological and lithotechnical approach: the example of Bologna (Lucca — Italy). Proc. “1st Congress of the Italian Association of Engineering and Environmental Geology”, Chieti, 19-20/2/2003, 277-291.

- D'Amato Avanzi G., Giannecchini R., Puccinelli A. (2004). The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides. An example in a temperate climate environment: the June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy). *Engineering Geology*, Vol. 73, pp. 215 – 228.
- Dallan & Nardi (1974) *Schema Stratigrafico e strutturale dell'Appennino settentrionale*. Mem. Accad. Lunig. Sc. "G. Capellini", 42 (1972) pp. 1-212
- Dallan & Nardi (1979) *il quadro paleotettonico dell'Appennino settentrionale: un'ipotesi alternativa*. Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Serie A, 85 (1978), pp. 289-298.
- Dallan N., Nardi R., Puccinelli A., D'Amato Avanzi (1991) Valutazione del rischio di frana in Garfagnana e nella Media Valle del Serchio (Lucca). 3) carta geologica e carta della franosità degli elementi "Sillano", "Corfino", "Fosciandora" e "Coreglia" (scala 1: 10.000) Boll. Soc. Geol. It., 110, 245-272.
- David R. M. (2002) *Arc Hydro: GIS for Water Resources*, ESRI Press, Redlands, CA.
- Elter P. (1960) *I lineamenti tettonici dell'Appennino a nord Ovest delle Apuane*. Boll. Soc. Geol. It. 79,2, pp. 273-312.
- Ercoli A. (2005) *-Metodologie fotointerpretative applicate all'individuazione delle aree a rischio idrogeologico*. Secondo Forum Nazionale "Rischio di frana e assetto idrogeologico nei territori collinari e montani. Questioni, metodi, esperienze a confronto. - A cura di Erminio M. Ferrucci e Oscar Zani. Maggioli Editore.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.) (2004) – *ArcGIS 9. Getting started with ArcGIS*. Redlands, California. ESRI.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.) (2004) – *ArcGIS 9. Geoprocessing in ArcGIS*. Redlands, California. ESRI.
- Federici P.R. & Rau A. (1980) *Note illustrative della neotettonica del foglio 96 Massa*. In Contrib. Prelim. Realizz. Carta neotettonica d'It. CNR Prog. Fin Geodi., publ. n. 356, pp. 1365-1382
- Finlay P.J., Fell R. (1997) Landslides: risk perception and acceptance. *Canadian Geotechnical Journal*, n. 34, pp. 169-188.
- Foti S., Lo Presti D., Pallara O., Rainone M.L., Signanini P. (2002) Indagini geotecniche e geofisiche per la caratterizzazione del sito di Castelnuovo Garfagnana (Lucca). *Rivista Italiana di Geotecnica*. XXXVI, n. 3, pp. 42- 60.
- Gens A., Hutchison J. N., Cavounidis S. (1988) *-Three-dimensional analysis of slices in cohesive soils.- Geotechnique* vol. 38, pp. 1–23.
- GU n. 64 del 18-3-2005 Approvazione del Piano di Bacino stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I), ai sensi delle leggi n. 183/1989 (articoli 17 e 18), n. 267/1998 (articolo 1, comma 1) e n. 365/2000 (articolo 1-bis, comma 1-bis).
- Hammond C., Hall D., Miller S., Swetik P. (1992), "Level I Stability Analysis (LISA) Documentation for Version 2.0," General Technical Report INT-285, USDA - Forest Service Intermountain Research Station.
- Hansen A. (1984) – *Landslide hazard analysis*. - In *Slope Instability*. Pp. 523-602, edited by Brunsden D. e Prior D.B., Wiley e Sons, New York.

- Hansen A., Franks C.A.M., Kirk P.A., Brimicombe A.J. (1995)* – The application of GIS to landslide hazard assessment in Hong Kong. – In A. Carrara e F. Guzzetti (Editors), *Geographical Information Systems in assessing Natural Hazard*, Kluwer Pub., Dordrecht, The Netherlands, pp.237-298.
- Hartlen J., Viberg L. (1988)* – General report: evaluation of landslide hazard. *Atti del 5th Int. Symp. On Landslides*, Lausanne, vol. 2, pp. 1037-1057.
- Hovland H. J. (1977)* Three-dimensional slope stability analysis method. - *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 103(GT9), 971– 986.
- Hungr O. (1981)* — *Dynamics of rock avalanches and other types of mass movements*. Tesi di dottorato, University of Alberta.
- Hungr O. (1987)*, An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions, *Geotechnique* 37(1), 113–117.
- Hungr O. (1994)* A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis: Discussion, *Canadian Geotechnical Journal* 31, 791–795.
- Hungr O., Evans S.G., Bovis M. J., Hutchinson J.N. (2001)* – “A review o the classification of landslides of the flow type”. *Environ.& Eng. Geosci.* VII, 3, pp.221-238.
- Joseph, M. M. and William M. 1998*, Using GIS in probabilistic assessment of earthquake triggered landslide hazard, *Journal of EARTHQAK ENGINEERING* 2 (4)593-623
- Keefer K.D. (2002)*. Investigating Landslides caused by earthquakes. A historical review. *Surveys in Geophysics* 23, pp. 473 - 510.
- Lam L.,Fredland D. G. (1993)* A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis, *Canadian Geotechnical Journal* 30, 905–919.
- Leshchisky D., Huang Ching-Chang (1992)* Generalized three dimensional slope stability analysis, *Journal of Geotechnical Engineering* 118(11), 1748–1763.
- Lo Presti D., Ferrini M. (2002)* - Presentazione del numero speciale della rivista dedicato agli studi di microzonazione sismica di Castelnuovo Garfagnana (Lucca). *Rivista Italiana di Geotecnica*. XXXVI, n. 3 , pp. 9- 16.
- Lo Presti D., Luzi L., Pergalani F., Petrini V., Puci I., Signanini P. (2002)* -Determinazione della risposta sismica dei terreni a Castelnuovo Garfagnana (Lucca) *Rivista Italiana di Geotecnica*. XXXVI, n. 3 , pp. 61- 74.
- Manis G., Homer C., Ramsey R.D., Lowry J., Sajwaj T., Graves S. (2000)*. The development of mapping zones to assist in land cover mapping over large geographic areas: A case study of the Southwest ReGAP Project. *Gap Analysis Bulletin* 9:13-16.
- Montgomery D.R., Dietrich W.E. (1994)* – “A Phisically based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding”. *Water Resources Research*, 30(4), pp. 1153-1171.
- Nardi R., Puccinelli A., De Lucia P.L. (1986)*.- Carta geologica e carta della franosità della Garfagnana e della media Valle del Serchio (Lucca) in scala 1:10.000. Elemento “Castelnuovo di Garfagnana” (scala 1:10.000). Tip SELCA, Firenze.
- Nardi R., Puccinelli A., D'Amato Avanzi G., Trivellini M. (1987)*.- Valutazione del rischio da frana in Garfagnana e nella media Valle del Serchio (Lucca). 2) Carta geologica e Carta della Franosità degli

- elementi “Sillico”, “Castelnuovo di Garfagnana”, “Cascio”, “Castelvecchio Pascoli”, “Galliciano”, “barga”, “Fornaci di Barga” e “Ghivizzano” (scala 1:10.000). Boll. Soc. Geol. It., 106, pp. 819-832.
- Nardi R., Puccinelli A., D'Amato Avanzi G., Caredio F., De Lucia P.L., Pellegrino G. (2000).- Carta della franosità del bacino del F. Serchio (scala 1:10.000) Tav. 6 (Sillicano, Castelnuovo di Garfagnana, Rontano, Sassi). Tip SELCA, Firenze.
- Pack, R. I, Tarboton D. G. & Goodwin C. N. (1998) - *The Sinmap Approach to Terrain Stability Mapping*. Paper Submitted to 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada 21-25 September 1998.
- Pack R.T., Tarboton D.G., Goodwin C.N., Prasad A. (2005) – “SINMAP User's manual – A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping – Version for ArcGIS 9.x and Higher”. Utah State University, Terratech Consulting Ltd., Canadian Forest Products Ltd., C.N. Goodwin Fluvial System Consulting.
- <http://www.engineering.usu.edu/dtarb/sinmap.html>
- Parker, A.J. (1982). The topographic relative moisture index: An approach to soil-moisture assessment in mountain terrain. *Physical Geography* 3: 160-168.
- Picarelli L. (1999).- Alcune considerazioni sui meccanismi di innesco e di propagazione delle colate in terreni sciolti e detritici. Atti di “ Previsione e Prevenzione di movimenti franosi rapidi”. Trento, pp. 163-179.
- Picarelli L. (2005) - *Movimenti lenti di versante nell'Appennino: le caratteristiche, le conseguenze sulle opere e gli insediamenti, la gestione del territorio* Secondo Forum Nazionale “Rischio di frana e assetto idrogeologico nei territori collinari e montani. Questioni, metodi, esperienze a confronto. - A cura di Erminio M. Ferrucci e Oscar Zani. Maggioli Editore.
- Pochini A., Allagosta M. (1990). Strumentazione per il monitoraggio di pendii instabili: sperimentazione sulla frana di Camporaghena (Lunigiana - MS). Atti del Convegno: Studio, Monitoraggio e Bonifica dei centri abitati instabili, S. Martino al Cimino - Viterbo 1990 - 1991, ENEA - Associazione Civita - ONG.
- Postpisch D. (Ed. 1985) *Catalogo dei terremoti italiani dall'anno 1000 al 1980*. C.N.R. Prog.Fin. Geodin., Quad. “la ricerca scientifica, 114, 2, Bologna, pp.239.
- Puccinelli A. (1987) Un esempio di tettonica recente nella valle del Serchio; il sollevamento di monte Perpoli. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem. Serie A. 94, pp.105-117.
- Sani F. (1992). Appennino Tosco – Emiliano. Guide Geologiche Regionali. Be - Ma Editrice.
- Tarboton, D. G., (1989), "The analysis of river basins and channel networks using digital terrain data," Sc.D. Thesis, Department of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge, MA, (Also available as Tarboton D. G., R. L. Bras and I. Rodriguez-Iturbe, (Same title), Technical report no 326, Ralph M. Parsons Laboratory for Water resources and Hydrodynamics, Department of Civil Engineering, M.I.T., September (1989).
- Tarboton, D. G., (1997), "A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models," *Water Resources Research*, 33(2): 309-319.

- Turner A.K., Schuster R.L. (eds) (1996) - Landslides. Investigation and mitigation. Transp. Research Board, National Research Council, Nat. Academy Press, Washington D.C., 673 pp.
- Van Westen C. J., Seijmonsbergen A. C., Mantovani F. (1999)- Comparing landslide hazard maps, *Natural Hazard* vol. 20, pp.137–158.
- Varnes D.J. (1978). “Slope Movements: Types And Processes”. In “Landslides Analysis and Control”. Edizioni Shuster R. L. & Krizek R. J., Transportation Research Board, Special Report n° 176, National Academy Of Sciences, Washington, pp. 11-33
- Varnes D.J. & Commission on Landslides and Other Mass Movements - IAEG (1984). “The principles and practise of landslide hazard zonation”. The UNESCO Press, Paris.
- Wu, W. and R. C. Sidle, (1995), "A Distributed Slope Stability Model for Steep Forested Watersheds," *Water Resources Research*, 31(8): 2097-2110.
- Xie M., Zhou G., Esaki T. (2001) Landslide hazard assessment using Monte Carlo simulation based on GIS, In: The 10th International Conference of IACMAG, Arizona, pp. 169–173.
- Xie, M., Esaki, T., Zhou, G., and Mitani, Y. (2003a). “Geographic information systems-based three-dimensional critical slope stability analysis and landslide hazard assessment.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129_12_, 1109–1118.
- Xie, M., Esaki, T., Zhou, G., and Mitani, Y. (2003b). “Three-dimensional stability evaluation of landslides and a sliding process simulation using a new geographic information systems component.” *Environ. Geol.*, 43, 503–512.
- Xie, M., Esaki, T., and Cai, M., (2004a). “A GIS-based method for locating the critical 3D slip surface in a slope.” *Comput. Geotech.*, 31, 267–277.
- Xie, M., Esaki, T., and Zhou, G. (2004b). “GIS-based probabilistic mapping of landslide hazard using a three dimensional deterministic model.” *Natural Hazards*, 33, 265–282.
- Xie, M., Esaki, T., and Cai, M., (2006). “GIS-based implementation of Three-Dimensional limit Equilibrium Approach of Slope Stability.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 132_5_, pp. 656-660.

<http://info.apat.it/> (sito INTRANET dell'APAT)

<http://www.gruppo183.org>

<http://www.engineering.usu.edu/dtarb/sinmap.html>

<http://www.serchio-autoritadibacino.it/piano/iniziopr.html>

<http://www.serchio-autoritadibacino.it>