

**DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA**

*Università degli Studi di Firenze*



**GOFFREDO MANZO**

**APPLICAZIONI DI TECNICHE GIS E  
MODELLI DI SUSCETTIBILITÀ PER LA  
PREVISIONE DEL RISCHIO DA FRANA A  
SCALA REGIONALE**

**settore disciplinare: GEO-05**

**Tutore:** Dott. Filippo Catani

**Coordinatore:** Prof. Federico Sani

XXII Ciclo

Firenze, 31 Dicembre 2010



*ad Amaranta e Federica . . . ora e sempre*



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Il dissesto idrogeologico in Italia . . . . .	1
1.2	Scopo del lavoro . . . . .	2
1.3	Fasi di lavoro . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Area di studio</b>	<b>7</b>
2.1	Inquadramento Geografico . . . . .	7
2.2	Inquadramento Geologico - Strutturale . . . . .	9
2.2.1	Unità Stratigrafico-Strutturali . . . . .	12
2.3	Inquadramento Geomorfologico . . . . .	19
2.4	Aspetti Climatici . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Analisi statistiche e relazioni tra i fattori predisponenti</b>	<b>25</b>
3.1	Correlazioni tra fattori predisponenti . . . . .	25
3.2	Correlazione fra parametri predisponenti e franosità . . . . .	34
3.2.1	Litologia . . . . .	34
3.2.2	Uso del Suolo . . . . .	36
3.2.3	Pendenza . . . . .	40
3.2.4	Curve Number . . . . .	42
3.2.5	Indice di anomalia Pluviometrica . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Metodologie per la definizione della suscettibilità da frana</b>	<b>47</b>
4.1	Metodi di analisi della suscettibilità . . . . .	48
4.1.1	Metodi Empirici . . . . .	49
4.1.2	Metodi Fisicamente Basati . . . . .	50

4.1.3	Metodi Statistici . . . . .	51
4.2	Metodi di valutazione dei risultati dei modelli . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Acquisizione della carta inventario dei fenomeni franosi</b>	<b>57</b>
5.1	Il Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) . . . . .	59
5.2	Il progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) . . . . .	61
5.2.1	Il progetto IFFI Sicilia . . . . .	65
5.3	Analisi dei dati acquisiti . . . . .	71
5.4	Definizione delle aree instabili e costruzione della banca dati . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Acquisizione della Cartografia Tematica</b>	<b>81</b>
6.1	Il Modello Digitale del Terreno (D.T.M.) . . . . .	82
6.2	La Pendenza . . . . .	84
6.3	L'Uso del Suolo e il progetto Corine Land Cover . . . . .	88
6.4	La Carta Geologica d'Italia a scala 1:100000 . . . . .	92
6.4.1	Litologia . . . . .	93
6.5	Il modello idrologico: il metodo del <i>Curve Number (CN)</i> . . . . .	98
6.5.1	Calcolo del parametro <i>CN</i> . . . . .	99
6.6	La Carta dell'Indice di Anomalia Pluviometrica . . . . .	103
6.6.1	Raccolta dati pluviometrici . . . . .	105
6.6.2	Metodologia utilizzata per l'elaborazione della Carta dell'Indice di Anomalia Pluviometrica . . . . .	107
<b>7</b>	<b>Omogeneizzazione dei dati geografici acquisiti</b>	<b>111</b>
7.1	La direttiva Europea INSPIRE . . . . .	111
7.1.1	Tempi di attuazione . . . . .	114
7.1.2	La situazione Italiana . . . . .	114
7.2	I sistemi di riferimento cartografici italiani . . . . .	117
7.2.1	Il Sistema di riferimento Roma40 e la rappresentazione conforme di Gauss-Boaga . . . . .	118
7.2.2	Il Sistema di riferimento ED50 (European Datum 1950) e la rappresentazione UTM (Universale Trasversa di Mercatore) . . . . .	120
7.2.3	Il Sistema di riferimento WGS84 (World Geodetic System 1984) e la rappresentazione UTM (Universale Trasversa di Mercatore) . . . . .	122

7.2.4	L'estensione dei fusi e il progetto del fuso unico (FUSO ITALIA)	122
<b>8</b>	<b>I Principi base dei Modelli Statistici Multivariati</b>	<b>127</b>
8.1	La Regressione Lineare Semplice e Multipla	127
8.1.1	La stima dei parametri	129
8.2	La Regressione Logistica Semplice e Multipla	130
<b>9</b>	<b>Applicazione del Modello di Regressione Logistica</b>	<b>135</b>
9.1	Le Unità di Condizioni Uniche (UCU)	135
9.2	Procedura di calcolo della suscettibilità (ArcSDM-Spatial Data Modeller Exstension)	138
9.2.1	Gli output del modello	155
9.3	Individuazione delle classi di suscettibilità	163
<b>10</b>	<b>Analisi e validazione dei risultati</b>	<b>171</b>
10.1	Macroarea 1 (Bacino di Gela-Platani-Salso)	173
10.2	Macroarea 2 (Val di Mazara)	177
10.3	Macroarea 3 (Versante Tirrenico)	182
10.4	Macroarea 4 (Bacino del Simeto)	186
10.5	Macroarea 5 (Monti Peloritani)	190
10.6	Macroarea 6 (Val di Noto)	195
<b>11</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>201</b>





# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Il dissesto idrogeologico in Italia

Il dissesto idrogeologico è fra le cause di rischio principali per l'assetto sociale ed economico del nostro paese. Questo è stato, ed è soprattutto oggi, fortemente condizionato dall'azione dell'uomo e dai continui cambiamenti del territorio che hanno incrementato la possibilità di accadimento di fenomeni disastrosi, e dall'aumentata presenza di beni e di persone nelle zone dove tali eventi sono probabili e si manifestano, con effetti a volte catastrofici. L'antropizzazione del territorio, il continuo disboscamento, l'apertura di cave, l'emungimento incontrollato dalle falde sotterranee, la mancata manutenzione dei versanti e delle valli fluviali e per finire un generale mancato rispetto dell'attuale legislazione urbanistica e di conseguenza un eccessivo abusivismo edilizio, hanno sicuramente aggravato il dissesto evidenziando la fragilità del territorio italiano.

Nell'ambito del rischio idrogeologico il diverso combinarsi di fattori geologici, morfologici e climatici dà luogo a un'ampia varietà di fenomeni di dissesto che differiscono per tipologia, cinematisimo, caratteri evolutivi e dimensioni delle aree coinvolte. Tra le diverse tipologie di eventi calamitosi, quali terremoti, eruzioni vulcaniche ed esondazioni, le frane rivestono una particolare importanza.

L'ingente numero di fenomeni franosi che sono avvenuti negli ultimi decenni in Italia [1] e nel resto d'Europa, ha offerto un'opportunità di studio, che ha arricchito il patrimonio di conoscenze dirette su questi fenomeni, stimolando la nascita di una nuova cultura di previsione e prevenzione, imperniata sia sull'individuazione delle aree più suscettibili al

rischio da frana che sull'attuazione di interventi diretti alla riduzione dell'impatto generato dai vari eventi di attivazione.

Sebbene in generale la maggior parte dei fenomeni franosi che si attivano siano eventi di riattivazione di movimenti gravitativi pregressi, che coinvolgono dunque aree già precedentemente identificate come "instabili" sulla base di semplici considerazioni "storiche", una tipologia di frane che assume un'importanza centrale nella valutazione della pericolosità e del rischio associato è costituita dagli eventi di neo-attivazione. Questi risultano particolarmente pericolosi, proprio a causa dell'impossibilità di ricorrere a semplici considerazioni storiche per la previsione sia del "dove" che del "quando".

Da un punto di vista legislativo, i concetti di previsione e prevenzione dai rischi naturali, sono stati introdotti in Italia con l'istituzione del Servizio Nazionale di Protezione Civile (Legge 24/2/1992 n.225), il quale ha definito nell'art.1 l'importante compito di "tutelare l'integrità della vita, i beni, gli insediamenti e l'ambiente dai danni o dal pericolo di danni derivanti da calamità naturali, da catastrofi e da altri eventi calamitosi".

Proprio grazie a strutture organizzative come la Protezione Civile sono diventati indispensabili strumenti di previsione in grado di fornire informazioni utili e tempestive a supporto delle decisioni per l'attivazione di piani di emergenza.

Particolare interesse rivestono oggi quei sistemi di allerta in grado di monitorare aree a scala regionale o addirittura nazionale, di facile consultazione ed utilizzo operativo e sfruttabili per la previsione e la prevenzione delle emergenze sia in ambito di Protezione Civile che in generale per attività di gestione del territorio.

## 1.2 Scopo del lavoro

Quando si parla di dissesto idrogeologico non si può non tenere conto che il problema rientra nel più ampio contesto di riferimento dell'analisi del rischio e della valutazione della pericolosità, concetti per i quali è sempre meglio fornire un'adeguata definizione.

Il *rischio* si definisce come

$$R_I = H \cdot V_I \cdot E [2]$$

dove *H* (*Hazard*) rappresenta la *pericolosità* (sinonimo: probabilità di occorrenza) cioè la probabilità che un evento potenzialmente distruttivo, di determinata intensità, si verifichi in una determinata zona in un determinato periodo di tempo.

Con  $V$  si intende la *vulnerabilità*, cioè il grado di perdita prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi esposti al rischio risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data intensità (l'inverso dell'attitudine di una determinata zona a sopportare un evento di Intensità  $I$ ) ed infine con  $E$  si considera l'*esposizione*, cioè il valore esposto dalla zona.

Il principale contributo della ricerca e della modellistica è centrato nel calcolo e nella definizione del fattore  $H$ , detto anche *pericolosità*.

La ricerca della pericolosità associata alle frane si può dividere in due componenti: la previsione spaziale e la previsione temporale. La prima, meglio conosciuta come *suscettibilità*, è volta alla localizzazione sul territorio delle aree più propense al dissesto e quindi alla realizzazione di carte di pericolosità relativa, con ripercussioni e applicazioni sia nel campo della pianificazione territoriale che in ambito di Protezione Civile.

Il presente progetto di ricerca si pone come obiettivo la realizzazione e la messa a punto di una metodologia in grado di valutare la propensione al dissesto dei versanti attraverso lo studio di quei fattori che si presume siano correlati con i fenomeni di instabilità. Tale metodologia deve soddisfare al tempo stesso criteri di scientificità, applicabilità, trasparenza, ripetibilità e aggiornabilità. Il modello sviluppato deve inoltre essere in grado di fornire agli utenti uno strumento di facile comprensione e applicabilità utile per il monitoraggio in tempo reale di grandezze a diversa tipologia connesse al rischio idrogeologico, e per le relative analisi e valutazioni degli eventi in corso.

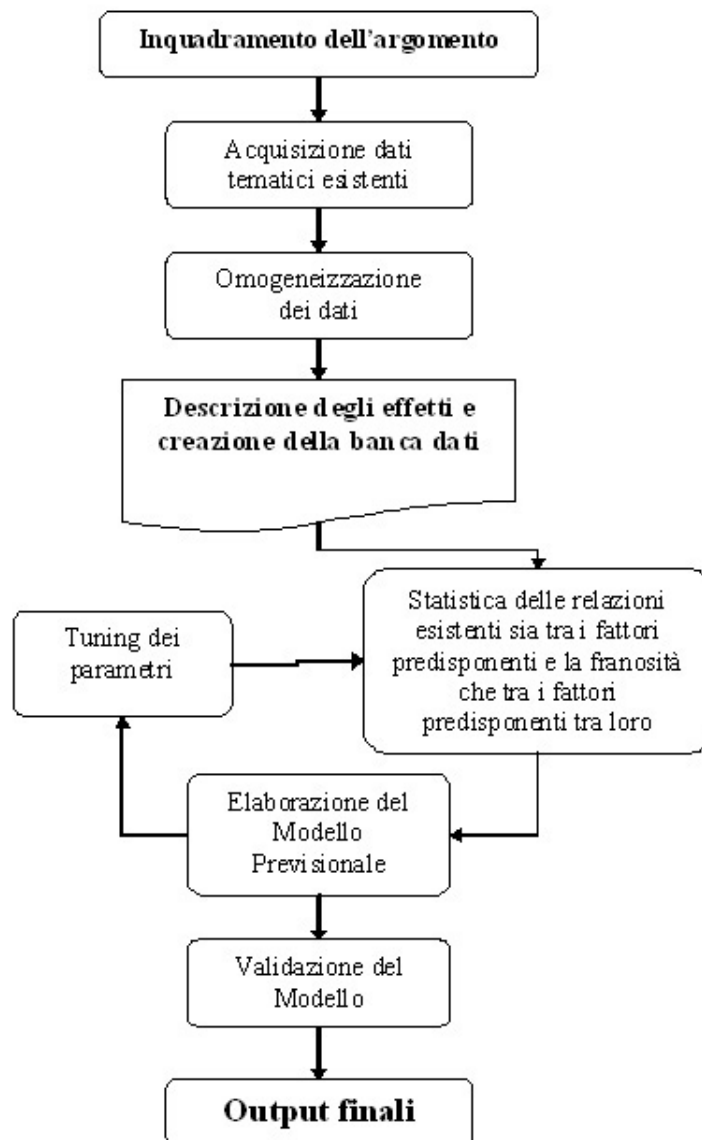
La realizzazione di un sistema modulare, scalabile e interoperabile con strumenti esterni, a scala regionale, deve gioco forza utilizzare l'uso dei software GIS (Geographic Information Systems) che permettono la manipolazione di dati grezzi già esistenti, la loro omogeneizzazione, il loro trattamento statistico e l'esecuzione di operazioni che in altri contesti sarebbero difficilmente realizzabili.

Inoltre le analisi spaziali e temporali delle informazioni inserite all'interno del GIS consentono l'individuazione reale di diversificati e molteplici scenari di pericolosità e di rischio.

L'area di studio prescelta è la regione Sicilia divisa in sei macroaree per garantire una riduzione del carico computazionale e soprattutto l'utilizzo del modello su macchine standard, eliminando così a monte l'utilizzo di super-computer.

### 1.3 Fasi di lavoro

La durata del progetto e la metodologia utilizzata prevede una suddivisione in fasi di realizzazione successive come evidenziato nel seguente diagramma di flusso (fig. 1.1).



**Figura 1.1:** Diagramma di flusso delle diverse fasi del progetto di ricerca

La prima fase è stata rivolta al reperimento dei dati che costituiscono la base empirica di partenza tra cui *in primis* la carta inventario delle frane, che è stata ridefinita creando una

nuova e più aggiornata banca dati e *in secundis* la litologia, l'uso del suolo e la pendenza i quali rappresentano quei fattori ambientali e morfometrici di primaria importanza per la comprensione delle condizioni di innesco dei fenomeni franosi.

Di seguito i dati sono stati omogeneizzati (data la provenienza da fonti diverse) e rielaborati, sia da un punto di vista geografico che topologico secondo le specifiche della direttiva europea INSPIRE [3].

Nella seconda fase si è proceduto allo studio statistico delle relazioni esistenti tra fattori predisponenti all'innesco di una frana e le frane stesse.

Successivamente i dati a disposizione sono stati utilizzati all'interno di modelli previsionali basati sulla statistica multivariata, come la *Regressione Logistica*, per la previsione e gestione del rischio idrogeologico a scala regionale [4, 5, 6].

Nella terza e ultima fase è stata svolta la validazione dei dati ottenuti nella seconda fase affinando l'analisi e stabilendo quali fossero le variabili più significative. I risultati della fase di validazione sono stati utilizzati per ritornare sulle analisi eseguite nella seconda fase, apportando delle modifiche nella scelta dei fattori predisponenti come per esempio l'aggiunta di due nuove variabili, quali il Curve Number (CN) e l'Indice di Anomalia Pluviometrica (Ia).



# Capitolo 2

## Area di studio

### 2.1 Inquadramento Geografico

La Sicilia ricopre una superficie di 25.428 km<sup>2</sup>, escluse le isole minori. Posizionata nel centro del mediterraneo, la sua forma triangolare ed il sistema montuoso determinano la sua suddivisione in tre aree distinte (fig. 2.1):

- l'area settentrionale o tirrenico, da Capo Peloro a Capo Boeo, con una superficie di circa 6.630 km<sup>2</sup>;
- l'area meridionale o mediterraneo, da Capo Boeo a Capo Passero, con una superficie di circa 10.754 km<sup>2</sup>;
- l'area orientale o ionico, da Capo Passero a Capo Peloro, con una superficie di circa 8.072 km<sup>2</sup>.

L'orografia del territorio siciliano mostra evidenti contrasti tra la posizione settentrionale, prevalentemente montuosa e quella centro-meridionale e sud-occidentale con un paesaggio caratterizzato per la maggior parte da rilievi modesti a tipica forma collinare, ad eccezione della catena montuosa dei Sicani.

Un altro paesaggio ancora è quello presente nell'area sud-orientale, con morfologia di altipiano e quello prettamente orientale dominato dall'edificio vulcanico dell'Etna.



**Figura 2.1:** Sicilia - Schizzo geografico

<b>Provincia</b>	<b>Comuni</b>	<b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Densità (ab/km<sup>2</sup>)</b>
Agrigento	43	3042	154
Caltanissetta	22	2128	133
Catania	58	3552	310
Enna	20	2562	71
Messina	108	3247	208
Palermo	82	4992	248
Ragusa	12	1614	187
Siracusa	21	2109	191
Trapani	24	2461	176
<b>TOTALE</b>	<b>390</b>	<b>25707</b>	<b>198</b>

**Tabella 2.1:** Densità abitativa per provincia (ISTAT 2000)



Amministrativamente la Sicilia è suddivisa in nove provincie (tab. 2.1), i cui capoluoghi sono: Agrigento, Caltanissetta, Catania, Enna, Messina, Palermo, Ragusa, Siracusa e Trapani.

I territori a più elevata altitudine mostrano una caratterizzazione ben definita: o sono ricoperti per la maggior parte da boschi, o al contrario sono incolti. In entrambi i casi, presentano una densità abitativa ridotta in confronto alle aree pianeggianti litoranee e ovviamente ai centri urbani maggiori.

## 2.2 Inquadramento Geologico - Strutturale

La geologia è uno dei fattori predisponenti al rischio da frana che maggiormente influiscono sulla valutazione della suscettibilità, poiché condiziona i parametri meccanici dei terreni e quindi la resistenza al taglio; i terreni coesivi sono caratterizzati da parametri di resistenza al taglio più scadenti rispetto ai terreni granulari e sono quindi soggetti ad elevata suscettibilità da frana, mentre per gli ammassi rocciosi la resistenza dipende dalle caratteristiche geomeccaniche della roccia intatta, dal livello di alterazione della roccia e dalle condizioni strutturali al contorno (discontinuità fratturazioni, ecc.).

La storia geologica della Sicilia è molto complessa, sia per la sua collocazione in un'area del Mediterraneo caratterizzata da un'estrema mobilità tettonica, sia per la natura sedimentaria delle rocce depositatesi in differenti domini paleo-geografici, sia per le vicissitudini tettoniche che si sono succedute dal Paleozoico superiore al Quaternario.

La Sicilia, in relazione al suo assetto geologico-strutturale, viene in maniera schematica suddivisa in tre elementi strutturali (fig. 2.2) che si susseguono da Nord verso Sud, rappresentati, in ordine da:

1. *un settore di catena*, che si sviluppa lungo la costa settentrionale dell'isola, dai Monti Peloritani all'arcipelago delle Egadi, costituito da un insieme di strutture stratigrafico-strutturali che derivano da deformazioni di domini paleo-geografici mesozoici paleocenici vergenti verso S-SE;
2. *un settore di avanfossa*, che occupa quasi per intero la porzione centro-meridionale dell'isola, articolandosi in due bacini di sedimentazione (Bacino di Caltanissetta e di Castelvetro) separati dai Monti Sicani che rappresentano la propaggine meridionale della catena;



**Figura 2.2:** Schema Tettonico della Sicilia [7]

1. Vulcaniti dell'Etna; 2. Successioni Plio-Pleistoceniche; 3. Successioni Tortoniane-Plioceniche; 4. Unità dell'Arco Calabro-Peloritano; 5. Unità Sicilidi; 6. Flysch Numidico; 7. Unità Panormidi; 8. Unità Imeresi; 9. Unità Sicane; 10. Unità Trapanesi; 11. Unità Iblee e Saccensi.

3. *un settore di avampaese*, localizzato nell'estremità meridionale dell'isola e costituito prevalentemente da rocce carbonatiche (Plateau Ibleo).

Il settore di catena si sviluppa lungo la costa settentrionale ed è la risultante della deformazione tettonica subita dai corpi geologici appartenenti a vari domini paleo-geografici, a seguito dei movimenti compressivi connessi con la rotazione antioraria oligo-miocenica del blocco Sardo-Corso ed alla collisione di questo con il margine continentale africano.

La zona di catena, nella Sicilia Occidentale è costituita dal sovrascorrimento di più unità tettoniche impilatesi con vergenza meridionale. Nel lavoro dal titolo "*Evoluzione Paleotettonica della Sicilia Nord-Occidentale (Giunta e Liguori, 1973)*" [8], hanno costruito per la catena un modello palinspastico che da Nord verso Sud prevede: una Zona Interna, una Piattaforma Panormide, un Bacino Imerese, una Piattaforma Intermedia, un Bacino Trapanese, un Bacino Sicano ed infine una Piattaforma Esterna.

Uno dei lavori più importanti sulla geologia della Sicilia, considerato ancora oggi un valido punto di riferimento è lo "*Schema Geologico della Sicilia (Catalano e D'argenio, 1982)*" [9], dove gli autori dividono le unità che costituiscono la catena in unità dislo-

cate (Unità Saccensi, Sicane e Trapanesi), unità stratigrafico-strutturali fortemente dislocate (Unità Imeresi, Panormidi, Prepanormidi), unità interne (Sicilidi) ed unità dell'Arco Calabro-Peloritano.

Nel 1987 *Montanari* [10] considera invece un Paleodominio Ibleo, uno Siculo Appenninico (Sicano, Imerese, Panormide), uno Sicilide ed infine il Paleodominio Tunisino. A quest'ultimo vengono riferiti i domini che gli autori precedenti avevano designato con il nome di Prepanormide, Trapanese e Panormide.

Oggi, in accordo con le vedute più recenti, è da ritenere che le Unità bacinali Sicane ed Imeresi siano sovrapposte sulle unità di piattaforma Trapanesi e Saccensi. Differenti opinioni si hanno invece circa la posizione geometrica fra le Unità Panormidi e Imeresi, con alcuni autori (*Lucchesi e Agnesi, 2007*) [11] che ritengono le Unità Imeresi sovrapposte tettonicamente alle Unità Panormidi ed altri che prevedono invece il sovrascorrimento delle successioni di bacino (Unità Imeresi) al di sopra delle successioni di mare basso (Unità Panormidi).

Il settore di avampaese, è localizzato nella porzione sud-orientale ed è costituito da rocce prevalentemente carbonatiche affioranti nell'area iblea. Questo settore è caratterizzato dalla presenza di un substrato debolmente deformato che ha permesso lo sviluppo di estese aree subpianeggianti localizzate ad alta quota, dissecate da frequenti e profondi canyon fluviocarsici.

### 2.2.1 Unità Stratigrafico-Strutturali

Nella presente tesi, per la descrizione delle unità stratigrafico-strutturali è stato preso come riferimento lo “*Schema Geologico della Sicilia*”[9] di Catalano e D’Argenio che distingue, dalle zone interne verso le esterne, vari domini accavallati gli uni sugli altri, vergenti verso sud e successivamente trasformati in unità stratigrafico-strutturali.

Di seguito una breve descrizione delle unità suddette.

#### Unità stratigrafico-strutturale Iblea

L’unità stratigrafico-strutturale Iblea (fig. 2.3) viene considerata come parte affiorante dell’avampese della Sicilia. Il plateau Ibleo consiste di una struttura sollevata e limitata da faglie normali con direzione NO-SE e verso nord da sistemi E-O. I terreni dell’area Iblea hanno un’età che va dal Trias superiore al Pleistocene. In questi terreni è possibile differenziare due successioni tipo che possono essere attribuite ad ambienti deposizionali in parte diversi tra loro.



**Figura 2.3:** Affioramenti dell’Unità Iblea

L’originaria piattaforma carbonatica Iblea, nel Giurassico si è divisa in due distinti domini: l’area di Siracusa e l’area di Ragusa. Alla fine del Lias questa differenziazione si è progressivamente ridotta per arrivare, durante il Malm sup.-Cretaceo, ad un ambiente deposizionale di tipo pelagico, comune ad entrambe le aree, con la presenza di calcari a Calpionelle e calcari a foraminiferi planctonici “*Scaglia*” fino ad arrivare al Cretaceo sup. dove sottili depositi di acque

basse si sono formati su isolati seamounts vulcanici [12].

#### Unità stratigrafico-strutturali debolmente dislocate

**Le unità stratigrafico-strutturali Saccensi (fig. 2.4)** derivano dalla deformazione, poco accentuata, del dominio Saccense e del fianco meridionale del dominio Sicano.

La stratigrafia del dominio Saccense è rappresentata da due successioni alquanto diverse tra di loro.

La successione stratigrafica tipica delle unità di Monte San Calogero e di Pizzo Telegrafo è costituita da diverse centinaia di metri di:

(a) calcari a stromatoliti e megalodonti (Norico-Lias medio); (b) calcari a crinoidi, rosso ammonitico nodulare, calcilutiti a lamellibranchi (Lias sup.-Malm);

(c) calcari a calpionelle (Giurassico sup.-Cretaceo inf.); (d) calcilutiti bianche a globotruncane e globorotarie “*Scaglia*” (Cretaceo sup.-Eocene); (e) calcilutiti marnose e calcareniti organogene risedimentate con nummuliti (Eocene-Oligocene inf.); (f) calcari a lepidocicline e rodoficee (Oligocene sup.); (g) calcareniti organogene glauconitiche (Miocene inf.); (h) marne sabbiose pelagiche con orbuline (Miocene inf.); (i) argille sabbiose, arenarie ed evaporiti (Tortoniano sup.-Messiniano); (j) marne bianche con globigerine e calcareniti risedimentate “*Trubi*” (Pliocene inf.).



**Figura 2.4:** Affioramenti delle Unità Saccensi

Nell'unità di Monte Genuardo la successione stratigrafica è costituita da circa un migliaio di metri di:

(a) breccie e calcari dolomitizzati, selciferi, risedimentati (Lias Inf.); (b) calcari oolitici e bioclastici risedimentati e calcari a crinoidi, breccie, calcilutiti, basalti (Lias-Malm); (c) calcari a radiolari con selci, calcari a calpionelle e aptici (Giurassico sup.-Cretaceo inf.); (d) marne con globotruncane da grigie a verdi e calcilutiti rosse “*Scaglia*” con potenti intercalazioni di megabreccie maastrichtiane (Cretaceo sup.-Paleocene); (e) calcilutiti marnose biancastre con globorotalie “*scaglia bianca*” (Eocene medio e sup.); (f) marne pelagiche con calcareniti organogene a nummuliti risedimentate, calcareniti organogene bianche con intercalazioni di marne (Oligocene-Miocene inf.); (g) marne argillose con orbuline (Serravalliano-Tortoniano); (h) depositi terrigeni ed evaporitici (Tortoniano sup.-Messiniano); (i) marne a globigerine “*Trubi*” (Pliocene inf.).

**Le unità stratigrafico-strutturali Sicane (fig. 2.5)** affiorano sia nella Sicilia occidentale che nella Sicilia Orientale. Esse derivano dalla deformazione del bacino Sicano e la loro

messa in posto può essere datata tra il Tortoniano inferiore e il Pliocene inferiore nella Sicilia occidentale e successivamente al Pliocene inferiore nella Sicilia orientale.



**Figura 2.5:** Affioramenti delle Unità Sicane

Due sono le principali successioni riconosciute. La prima può essere ricavata più o meno completamente nell'unità Pizzo Mondello, Monte Barracù e Monte Rose ed è composta da diverse centinaia di metri di:

(a) marne e calcari rossastri a luoghi tufacei con intercalati blocchi arrotondati di calcari organogeni permiani, arenaree micacee con faune di affinità ladinica e fusulinidi risedimentate e rocce basiche (Trias medio-Carnico);

(b) argille pelagiche grigio scure, calcari a lamellibranchi (Carnico); (c) calcari a dolomie con selce, breccie dolomitizzate, calcari con lamellibranchi e radiolari (Norico-Lias inf.); (d) biocalcareni a crinoidi, calcari con elementi neritici risedimentati, vulcaniti basiche (Lias medio-Malm); (e) calcilutiti a calpionelle a luoghi silicizzate (Giurassico sup.-Cretaceo inf.); (f) calcilutiti a globotruncane da bianche a rosse "Scaglia" e megabreccie (Maastrichtiano); (g) calcilutiti marnose bianche e rosse (Cretaceo sup.-Eocene); (h) calcareniti organogene risedimentate e marne verdi (Oligocene); (i) calcareniti organogene glauconitiche (Miocene inf.); (j) argille e marne sabbiose con orbuline (Serravalliano-Tortoniano); (k) depositi gessosi (Messiniano).

La seconda successione stratigrafica rappresenta la parte più settentrionale del dominio Sicano e consiste di:

(a) calcari pelagici grigi e breccie calcaree (Lias); (b) calcari rossi risedimentati (Dogger); (c) calcari nodulari rosa (Malm); (d) calcari a calpionelle (Titonico sup.-Berrosiano); (e) calcari a foraminiferi planctonici "Scaglia" (Cretaceo sup.); (f) calcareniti organogene glauconitiche (Miocene inf.); (g) marne grigie (Miocene medio e sup.).

**Le unità stratigrafico-strutturali Trapanesi (fig. 2.6)** derivano dalla deformazione dei Domini Trapanesi, affiorano largamente nella parte più occidentale della Sicilia (dove raggiungono spessori di oltre 2.000 m) e nella parte centro-occidentale dell'isola. Le unità distaccate dal loro basamento sono state accavallate sopra le marne argillose del Tortoniano

inf.-Serravalliano dei Domini Sicani e Saccensi.

La loro successione è costituita da diverse centinaia di metri di:

(a) calcari stromatolitici e dolomie, alternantisi ciclicamente a calcari ad alghe e megalodonti (Trias sup.-Lias medio); (b) calcari a crinoidi rossi, vulcaniti basiche, calcari ammonitici rossi nodulari (Lias sup.-Malm sup.); (c) calcilutiti a calpionelle e globotruncane (Giurassico sup.-Cretaceo sup.); (d) Calcareniti organogene glauconitiche (Miocene inf.); (e) marne argillose ad orbuline (Serravalliano-Tortoniano).



**Figura 2.6:** Affioramenti delle Unità Trapanesi

### Unità stratigrafico-strutturali fortemente dislocate

**Le unità stratigrafico-strutturali Imeresi (fig. 2.7)** affiorano diffusamente dai Monti di Trapani alle Madonie e verso est fino ai Nebrodi.



**Figura 2.7:** Affioramenti delle Unità Imeresi

Due sono le principali unità che caratterizzano i terreni imeresi: l'unità di Sagana e l'unità di Piana degli Albanesi. Verso est affiora anche l'unità di Pizzo di Cane analoga all'unità di Sagana e che ne costituisce la continuazione laterale verso est [13]. Queste unità si accavallano su quelle derivanti dalla deformazione dei Domini Trapanesi e Sicani, distaccatesi dal loro basamento intorno al Miocene inf. e medio.

La successione caratteristica delle unità Imeresi è data da un migliaio di metri e oltre di:

(a) argille rosse e verdi e marne grigie, calcilutiti con lamellibranchi, basalti (Carnico); (b) calcilutiti con selci ad Halobie e radiolari e calcareniti organogene e risedimentate (Norico); (c) breccie dolomitizzate, calcareniti dolomitizzate e risedimentate, megabreccie (Lias); (d) argilliti silicee, radiolariti con intercalazioni di calcareniti risedimentate (Lias

sup.-Cretaceo inf.); (e) marne a radiolari, calcilutiti e marne rosse con globotruncana e globorotalia “*Scaglia*” con intercalazioni di calcareniti organogene con nummuliti risedimentate (Cretaceo-Eocene); (f) argilliti ed arenarie “*Flysch Numidico*” (Oligocene-Miocene inf.).

**Le unità stratigrafico-strutturali Panormidi (fig. 2.8)** affiorano da Capo San Vito fino alle Madonie con andamento O-E. Dalla deformazione della piattaforma Panormide si sono formate le due unità principali: l’unità Cozzo di Lupo e l’unità Monte Gallo-Monte Palmeto, scollatesi dal basamento nel Miocene inferiore.

L’unità Monte Dipilo-Monte Mufara è presente solo nelle Madonie e si può considerare equivalente alle due unità precedentemente descritte.

Una successione tipo è costituita da centinaia di metri di:

(a) calcari stromatolitici e calcari con megalodonti, calcari algali, biolititi a spugne e coralli (Norico-Lias inf.); (b) breccie dolomitiche e calcari dolomitici risedimentati (Giurassico inf.); (c) calcari con stromatoliti e molluschi, calcari algali e calcari d’acqua bassa risedimentati (Cretaceo-Giurassico); (d) calcilutiti bianche e rosse con globotruncana e globorotalia “*Scaglia*” (Cretaceo-Eocene inf.); (e) argilliti ed arenarie “*Flysch Numidico*” (Oligocene-Miocene inf.).



**Figura 2.8:** Affioramenti delle Unità Panormidi

### Unità Interne

**Le unità Sicilidi (fig. 2.9)** sono costituite da terreni derivanti da domini più interni rispetto ai domini panormidi e sovrapposti geometricamente alle unità esterne della catena siciliana.

Su di esse poggiano le unità tettoniche dell’Arco Calabro e i depositi post-orogenici del Miocene-Pliocene. Le Sicilidi, secondo *Ogniben* [14, 15, 16] sono costituite da due unità tettoniche sovrapposte tra loro. La più bassa è l’unità di Troina costituita da terreni eocenici e medio miocenici mentre l’altra, geometricamente più alta, è l’unità di Cesarò costituita da terreni compresi tra il Giurassico sup. e l’Eocene inferiore.



I terreni più tipici delle Sicilidi sono le *argille varicolori* (Eocene sup.-Oligocene), con spessori di circa un migliaio di metri, che spesso appaiono come argille marnose da verdi a rosse ben stratificate, a tratti tettonizzate, con intercalazioni di arenarie e calcari nummulitici.



**Figura 2.9:** Affioramenti delle Unità Sicilidi

**Unità dell'Arco Calabro-Peloritano (fig. 2.10)** negli anni molte sono state le interpretazioni proposte da vari autori sulla natura dell'Arco Calabro-Peloritano. Tra le più convincenti è quello secondo cui l'Arco Calabro risulta essere un frammento di catena alpina che ha interagito con l'Appennino [17].

I differenti elementi tettonici presenti nella regione, secondo questa interpretazione, derivano da almeno quattro domini diversi deformati in numerose falde sovrapposte: (a) domini appenninici; (b) domini intermedi "*Austroalpini*"; (c) domini della Tetide centrale; (d) domini di collocazione paleogeografica incerta.

I Peloritani lungo la linea di Taormina, appaiono sovrascorsi sopra le unità interne della catena siciliana (Sicilidi).

Le unità stratigrafico-strutturali dei Peloritani possono essere divise in tre gruppi, che dal basso verso l'alto sono: 1) unità Longi-Taormina; 2) unità con metamorfismo di basso grado; 3) unità con metamorfismo di alto grado.

L'unità Longi-Taormina è costituita da un basamento pre-Triassico su cui poggiano in discordanza conglomerati e arenarie di tipo *verrucano* del Giurassico inf., da depositi in facies di piattaforma carbonatica e in seguito di *seamount*, da radiolariti e calcari marnosi (Giuras-



**Figura 2.10:** Affioramenti dell'Unità dell'Arco Calabro-Peloritano

sico), da calcari a calcionelle e calcari di tipo *Scaglia* (Giurassico sup.-Cretaceo sup.) con megabrecce calcaree del Cretaceo sup. ed infine conglomerati, marne e siltiti (Paleogene).

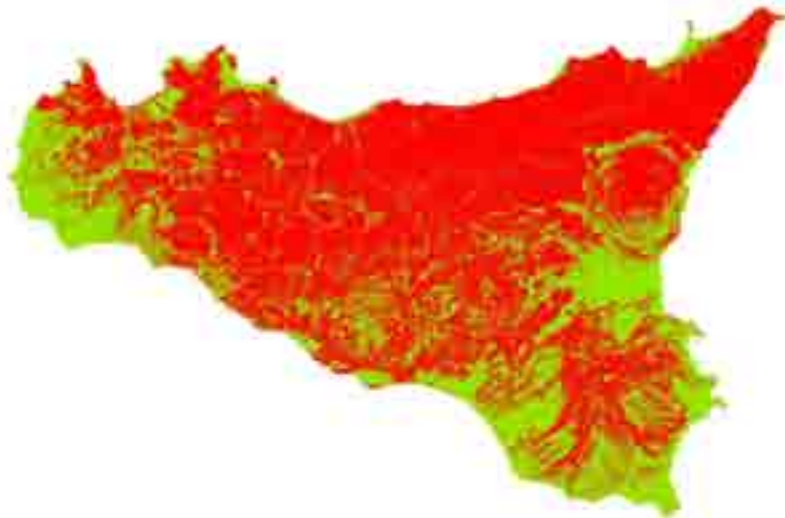
## 2.3 Inquadramento Geomorfologico

Lo studio delle dinamiche geomorfologiche di un territorio si rivolge alla identificazione delle forme del rilievo terrestre e dei processi che le hanno generate. Tali dinamiche, che sono dovute all'interazione tra i fattori climatici, morfologici e geologici, fanno sì che il paesaggio sia soggetto ad un continuo processo di modellamento.

A tali fattori se ne aggiunge un altro, determinante per l'assetto geomorfologico, che è quello antropico: la valutazione sulle condizioni di stabilità dei versanti naturali condiziona in maniera fondamentale la scelta degli indirizzi di sviluppo a livello urbano e regionale, in quanto trova implicazioni dirette in ogni tipo di attività.

La suddivisione del territorio regionale siciliano in funzione dei suoi caratteri geomorfologici è naturalmente legata all'assetto geologico-strutturale.

Dell'intero territorio siciliano la morfologia collinare interessa il 62% dell'intera superficie, la morfologia montuosa il 24% e la pianura il 14%; le coste si sviluppano complessivamente per 1.637 km incluse le isole minori (fig. 2.11) [11].



**Figura 2.11:** Distribuzione delle aree montano-collinari (*in rosso*) nel territorio siciliano

Come si è detto nel paragrafo precedente, la catena, rappresentando la prosecuzione dell'Appennino, assume la denominazione di Appennino-Siculo e si articola in diversi gruppi montuosi. Quello più orientale è costituito dai monti Peloritani, compresi tra Capo Peloro e Portella Mandrazzi, le cui cime raramente superano i 1.000 m: sono formati da una serie di

rilievi aspri, costituiti prevalentemente da rocce metamorfiche e, nei settori più occidentali, da rocce sedimentarie in facies di flysch.

Più a Ovest l'Appennino-Siculo prosegue con i monti Nebrodi, mediamente più elevati dei precedenti e caratterizzati da forme più dolci e arrotondate per la presenza di terreni prevalentemente argillosi e arenacei, dotati di elevata erodibilità.

A Ovest dei Nebrodi, separato dalla vallata del fiume Pollina, si trova il gruppo montuoso delle Madonie, costituito da rocce carbonatiche e arenaceo-argillose, che raggiunge i 1.979 m di altezza a Pizzo Carbonara.

La grande diffusione di rocce calcaree ha favorito il notevole sviluppo del carsismo, sia superficiale che profondo, che ha modellato larga parte del paesaggio delle alte Madonie e dato origine a numerose cavità sotterranee. I rilievi più alti sono bordati da ampi versanti in larga parte coperti da potenti falde detritiche che sono sede di imponenti fenomeni franosi sia superficiali che profondi.

Più ad occidente, la catena, la cui costituzione litologica diviene prevalentemente calcarea, si articola nei rilievi dei Monti di Termini Imerese-Trabia con quote che raggiungono al massimo i 1.350 m. I rilievi montuosi, oggi quasi del tutto privi di vegetazione arborea, sono interessati dalla notevole diffusione di morfologie carsiche epigee ed ipogee a cui, nelle aree costiere, si aggiungono numerose cavità di origine marina.

Infine, separati dalla Piana di Partinico, seguono i Monti di Trapani, anch'essi prevalentemente di natura carbonatica, di cui le isole Egadi costituiscono l'estrema propaggine occidentale con quote massime intorno i 1.110 m.

La fascia costiera settentrionale si presenta a tratti bassa e sabbiosa intercalata da tratti di costa a falesia. In più tratti la costa presenta lembi di terrazzi marini, che testimoniano i successivi livelli di stazionamento del mare plesistocenico, ed una estesa pianura costiera marginata da terrazzi marini, posizionata nella porzione centrale del Golfo di Termini Imerese, formatasi in tempi relativamente recenti per gli apporti alluvionali dei fiumi Torto e Imera.

I Monti Sicani, che occupano il settore sud-occidentale dell'isola, costituiscono un'appendice meridionale del segmento occidentale della catena con quote comprese tra i 1.180 e 1.600 m.

Il settore di avanfossa, è caratterizzato dalla presenza di rocce sedimentarie di diversa litologia, di età terziaria e quaternaria: fra di esse notevole importanza rivestono le successioni della serie evaporitica di età messiniana.

Ad occidente dei Sicani le aree più interne sono caratterizzate da rilievi collinari che si raccordano alla costa tramite una gradinata di terrazzi marini degradanti fino al mare.

L'idrografia è caratterizzata dalla presenza dell'ampio bacino del fiume Belice, il cui tratto terminale presenta una caratteristica morfologia a terrazzi fluviali. Ad oriente si sviluppa il caratteristico paesaggio collinare "dell'Altopiano Solfifero", che è dominato da forme ondulate legate alla presenza di gessi e di calcari evaporitici e in alcuni casi ad affioramenti di arenarie e conglomerati miocenici. La diffusa presenza di terreni di natura argillosa favorisce lo sviluppo di intensi processi erosivi, cui si associano frequenti movimenti franosi che rendono estremamente instabili e desolati questi territori.

Più a est sono presenti i monti Erei, di natura arenacea e calcarenitico-sabbiosa, isolati e generalmente collinari, ove l'erosione, controllata dall'assetto strutturale, ha dato luogo a rilievi tabulari (*mesas*) o monoclinali (*cuestas*).

Questi settori sono solcati da alcuni dei maggiori corsi d'acqua della Sicilia tra cui il fiume Platani ed il fiume Imera Meridionale (o Salso). Quest'ultimo sfocia nel Golfo di Gela che costituisce una vasta piana costiera alluvionale bordata da estesi campi dunari.

La porzione sud-orientale dell'isola è occupata dall'Altopiano Ibleo, di natura calcarea e calcarenitica, che si caratterizza per l'assetto morfologico generalmente tabulare legato alla giacitura suborizzontale delle rocce che lo costituiscono, e che è disseccato da profonde incisioni fluviali.

Il settore orientale compreso fra i Peloritani e l'area iblea è dominato dalla presenza dell'Etna, ai cui piedi si sviluppa la Piana di Catania, formata dalle alluvioni del fiume Simeto, che rappresenta la più estesa pianura della Sicilia.

Più a nord, lungo la costa ionica, si trova la foce del fiume Alcantara che si origina dal versante meridionale dei Peloritani e che, alimentato anche dalle acque che circolano sul versante settentrionale dell'Etna, è il corso d'acqua caratterizzato dalla maggiore portata media in Sicilia. La crescita dell'edificio vulcanico dell'Etna, verificatasi a seguito della migrazione verso Nord dei centri di emissione che avevano in precedenza dato luogo al più antico vulcanismo Ibleo, ha determinato, tra l'altro, la progressiva deviazione dei tracciati originari del Simeto e dell'Alcantara e la creazione di laghi di sbarramento vulcanico, come il lago di Gurrída, e zone umide caratterizzate da incerte direzioni di drenaggio.

## 2.4 Aspetti Climatici

La pubblicazione dei volumi sulla “*Climatologia della Sicilia*” [18] ha fornito un primo quadro di riferimento per la caratterizzazione climatica della Sicilia.

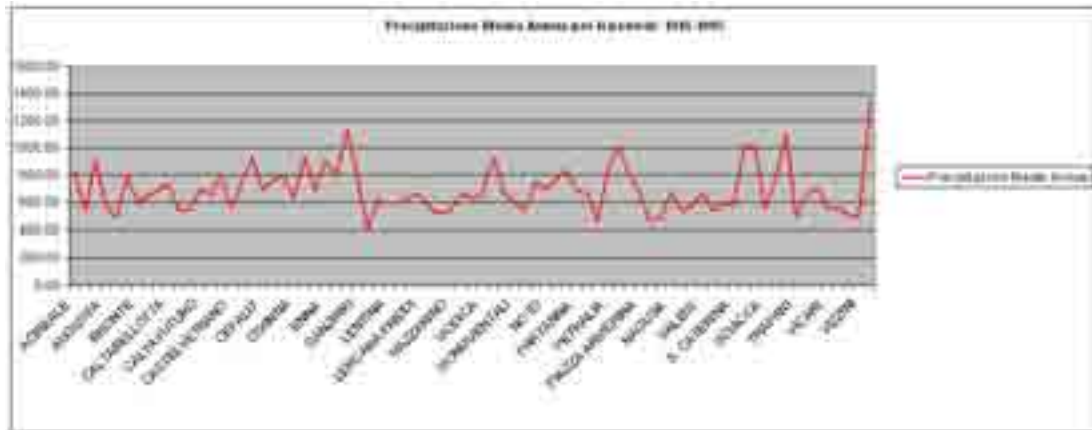
Considerando le condizioni medie dell'intero territorio, la Sicilia, secondo la classificazione macro-climatica di Köppen, può essere definita una regione a clima temperato-umido (di tipo C) (media del mese più freddo inferiore a 18 °C ma superiore a -3 °C), o meglio mesotermico-umido sub-tropicale, con estate asciutta (tipo Csa), cioè il tipico *clima mediterraneo*, caratterizzato da una temperatura media del mese più caldo superiore ai 22 °C e da un regime delle precipitazioni contraddistinto da una concentrazione delle precipitazioni nel periodo freddo (autunno-inverno). Tuttavia, questa definizione ha appunto un valore solamente macro-climatico, cioè serve a distinguere, ad esempio, il clima siciliano da quello del Medio Oriente o dell'Europa centrale.

Nella realtà la posizione geografica dell'isola, che per la sua collocazione baricentrica nell'area mediterranea è esposta alle influenze sia delle masse d'aria continentali sia di quelle temperate marittime, e il suo articolato assetto orografico, danno luogo, nei diversi settori, a marcate differenze climatiche. Il fattore orografico inoltre, controllando la distribuzione delle piogge, riduce l'effetto mitigatore del mare nelle aree più interne, rendendo le condizioni climatiche fortemente contrastate.

Dal punto di vista pluviometrico il clima può essere considerato bi-stagionale, con l'80% delle piogge concentrate nel semestre autunno-inverno; ne consegue un'aridità elevata, che vede diverse aree, soprattutto del settore meridionale, con ben sette mesi asciutti.

Le informazioni per ciò che riguarda il regime pluviometrico sono disponibili presso il Servizio Idrografico della Regione, dal quale sono stati estratti i dati di pioggia di 78 stazioni pluviometriche sparse su tutto il territorio siciliano. La media delle precipitazioni annue osservate su queste stazioni è di circa 694 mm per un periodo di osservazione di 50 anni compreso tra il 1945 e il 1995 (fig. 2.12).

Dall'analisi dei dati si osserva che le precipitazioni registrate, sono tipiche di un clima temperato-mediterraneo, caratterizzato da un periodo piovoso da ottobre ad aprile e minimi stagionali da giugno ad agosto. Dal momento che le piogge sono concentrate in pochi mesi, i fenomeni di ruscellamento superficiale, di infiltrazione e di evaporazione assumono particolare importanza. Le aree più piovose sono localizzate in corrispondenza dei versanti settentrionali dell'Appennino Siculo (precipitazioni medie annue intorno ai 1.000 mm che



**Figura 2.12:** Precipitazione Media Annuale per il periodo 1945-1995

raggiungono i 1.300 mm sui Nebrodi e sui Peloritani), che costituisce una barriera nei confronti dei venti dominanti provenienti dai quadranti settentrionali. Ovviamente il picco di piovosità si localizza sull'Etna (fino a 2.000 mm annui) per la concomitante influenza della posizione geografica e del fattore orografico. Importanti sono anche i movimenti delle masse d'aria provenienti dai quadranti meridionali particolarmente intensi lungo le coste del Canale di Sicilia; essi sovente portano condizioni di caldo torrido mitigando il clima delle stagioni invernali.

Di contro le condizioni termiche risultano più uniformi (fig. 2.13), con la generale diminuzione dei valori medi delle temperature con l'altitudine e verso le zone più interne, caratterizzate da inverni più freddi ed escursioni termiche più accentuate. I massimi estivi si riscontrano soprattutto nel settore centro-meridionale, ove, in qualche località interna, le temperature possono superare i 42° C.

Da quanto detto, pertanto, si evince che lo studio climatico del territorio siciliano non risulta affatto semplice; e il grado di complessità va aumentando, se dai valori medi annui si passa a quelli mensili, oppure se si analizzano gli eventi estremi delle temperature massime e minime, o gli eventi piovosi eccezionali. In quest'ultimo caso, infatti, la variabilità spaziale e temporale diventa molto elevata, principalmente a causa della complessità morfologica del territorio regionale, cui prima si è fatto cenno.



**Figura 2.13:** Temperatura media mensile espressa in gradi C° relativa al periodo 1945-1995



## Capitolo 3

# Analisi statistiche e relazioni tra i fattori predisponenti

L'analisi statistica descrittiva permette di analizzare le relazioni d'interazione tra fattori ambientali e successivamente, incrociando i singoli fattori con i dissesti della carta inventario, di individuare le caratteristiche salienti dei fattori di franosità [50]. Tale analisi statistica deve essere sempre preliminare alla fase di valutazione della pericolosità ed inoltre deve dare la possibilità di individuare gli intervalli di valori significativi per la classificazione dei fattori.

Nel nostro caso l'analisi statistica è stata condotta incrociando i parametri di franosità prima fra loro e in seguito con le frane censite nell'inventario, partendo dal presupposto che nell'analisi multivariata bisogna prima di tutto valutare la statistica monovariata e bivariata così da poter tenere in considerazione la rilevanza statistica delle singole classi.

### 3.1 Correlazioni tra fattori predisponenti

Per prima cosa sono stati incrociati i fattori relativi alla litologia, all'uso del suolo e ai valori di CN con la pendenza al fine di analizzare le reciproche relazioni e influenze.

L'analisi della distribuzione di frequenza della litologia all'interno di ogni classe di pendenza (fig. 3.1) evidenzia che il complesso litologico delle argille risulta distribuito in prevalenza nelle classi con pendenza dai 5-12° e 12-18° (ciò favorisce pendenze basse e pendii dolci e arrotondati). Di contro le argille costituiscono il litotipo più frequente e che proprio la

classe in cui sono maggiormente presenti è quella che ha una maggiore abbondanza relativa in confronto alle altre classi di pendenza.

L'altro dato che emerge è che all'aumentare della pendenza (pendenze  $>32^\circ$ ), i litotipi argillosi diminuiscono e vengono sostituiti gradualmente da litotipi carbonatici e filladico-matamorfici, anche se proprio quest'ultimo, essendo la sua estensione all'interno dell'area estremamente limitata (solo il 3.5%), statisticamente risulta essere un dato poco significativo.

Dalle osservazioni suddette si può trarre una conclusione fondamentale, e cioè che la pendenza del versante è fortemente determinata dalla litologia affiorante e quindi come litologie più consistenti (terreni carbonatici) siano associate a pendii acclivi, mentre rocce deboli (terreni argillosi o arenaceo-argillosi) favoriscano maggiormente morfologie caratterizzate da minor pendenza.

Per quanto riguarda la distribuzione di frequenza dell'uso del suolo per ogni classe di pendenza (fig. 3.2) si nota che nelle classi di pendenza molto basse, al di sotto di  $18^\circ$  prevalgono i seminativi e le colture permanenti, mentre per pendenze più alte, superiori ai  $18^\circ$ , prevalgono le zone boscate e le zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea, arrivando a superare il 70% della copertura del territorio per pendenze maggiori di  $32^\circ$ . In questo caso è ragionevole supporre che la pendenza influenzi l'evoluzione e lo spessore dei suoli e, di conseguenza, la vegetazione dominante.

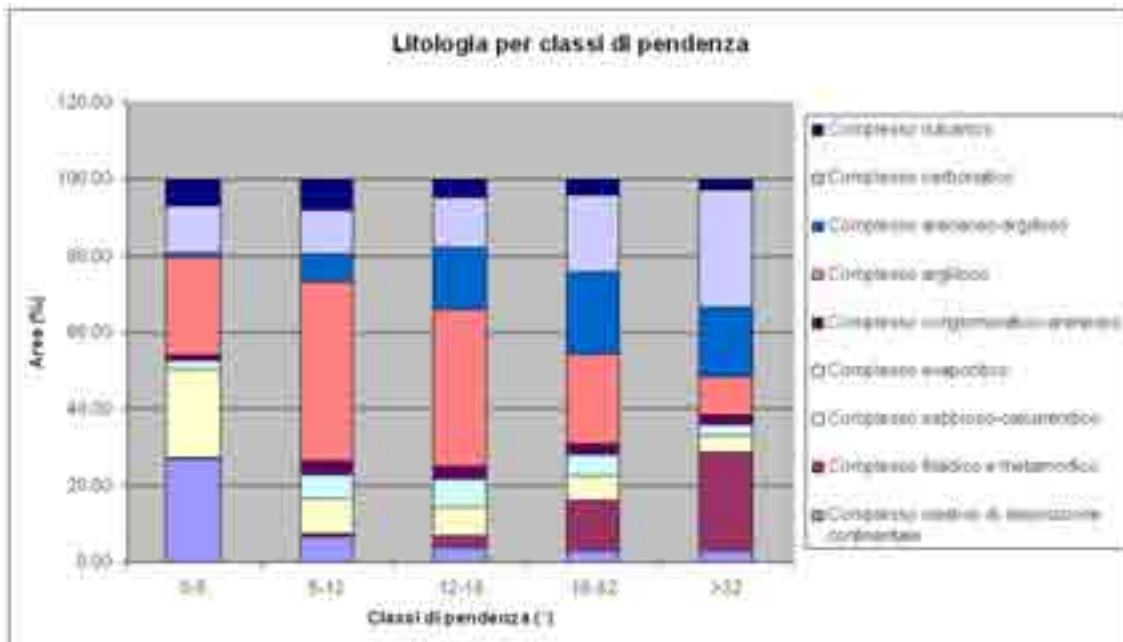
Il grafico di figura 3.3 mostra la distribuzione di frequenza dei valori di CN per classi di pendenza, evidenziando una prevalenza di valori di CN medio-alti (da 76 a 88) equamente distribuiti nelle cinque classi di pendenza.

In secondo luogo è stato incrociato il dato relativo all'uso del suolo con le classi litologiche, evidenziando un'alta percentuale di materiali argillosi per le classi relative ai seminativi, alle colture permanenti e alle zone agricole eterogenee mentre, come era prevedibile, nelle zone estrattive, nelle zone industriali e nelle zone urbanizzate predominano i materiali clastici di deposizione continentale e i materiali carbonatici (istogramma di figura 3.4).

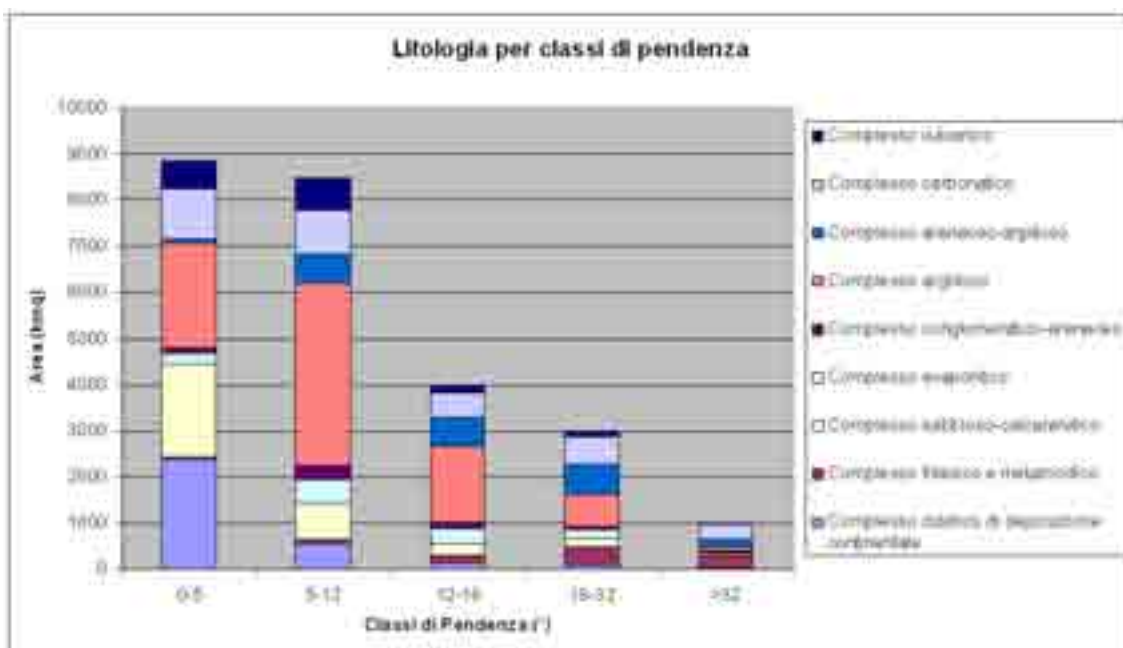
L'istogramma di figura 3.5 mostra la distribuzione dei valori di CN per classi litologiche, evidenziando valori di CN medio-alti (da 76 a 88) principalmente nei terreni argillosi e arenaceo-argillosi, alti (da 81 a 88) nel complesso clastico di deposizione continentale e molto-alti (da 88 a 98) nel complesso vulcanico.

Le classi di uso del suolo che presentano valori di CN medio-alti (da 76 a 88) sono i

seminativi, le colture permanenti, le zone agricole eterogenee e le zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea; mentre valori alti (da 88 a 98) sono presenti nelle zone aperte con vegetazione rada o assente, nelle zone estrattive, nelle zone industriali e nelle zone urbanizzate (istogramma di figura 3.6) [51].

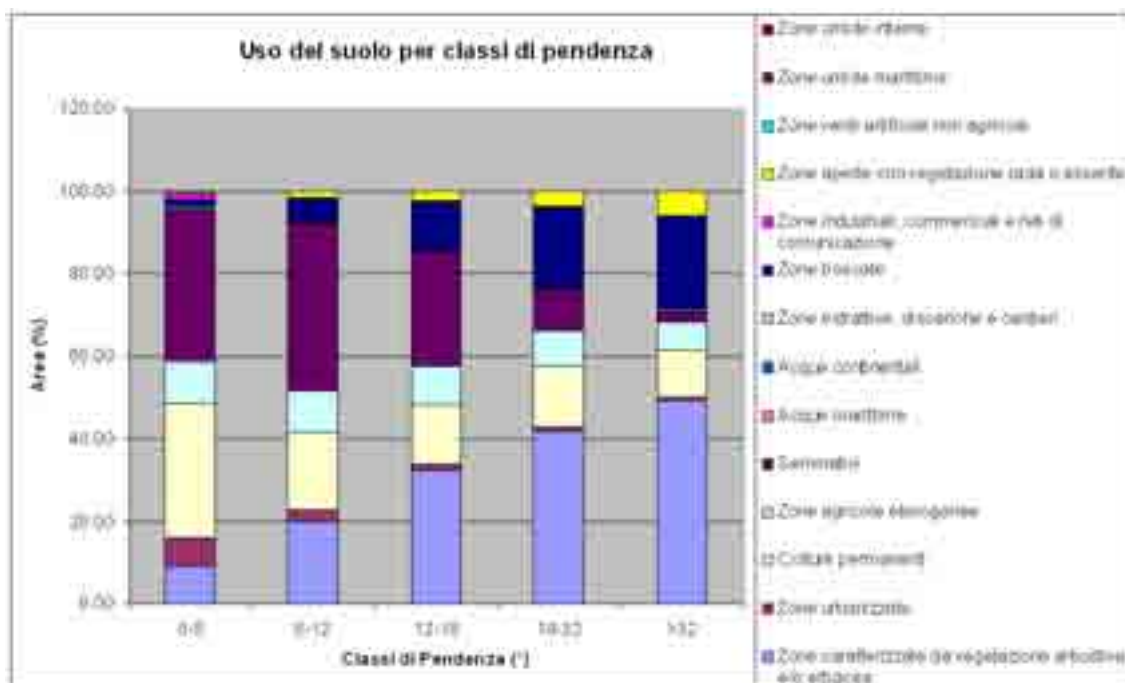


(a) Area espressa in percentuale (%)

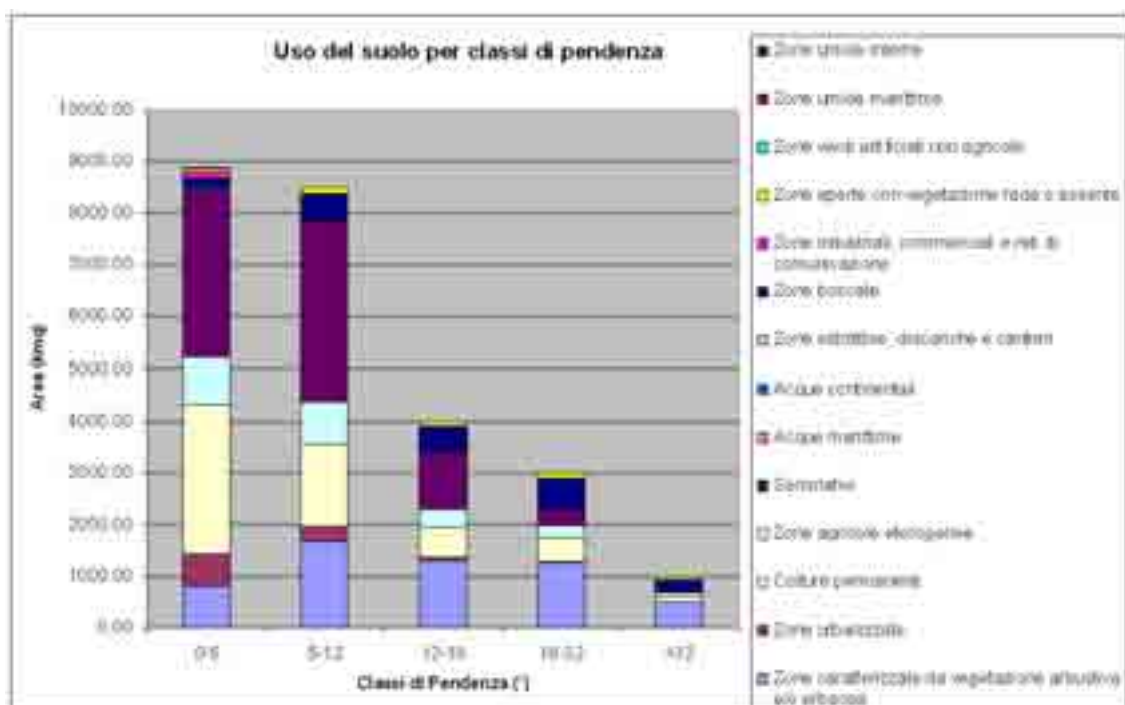


(b) Area espressa in  $km^2$

**Figura 3.1:** Distribuzione della litologia per classe di pendenza

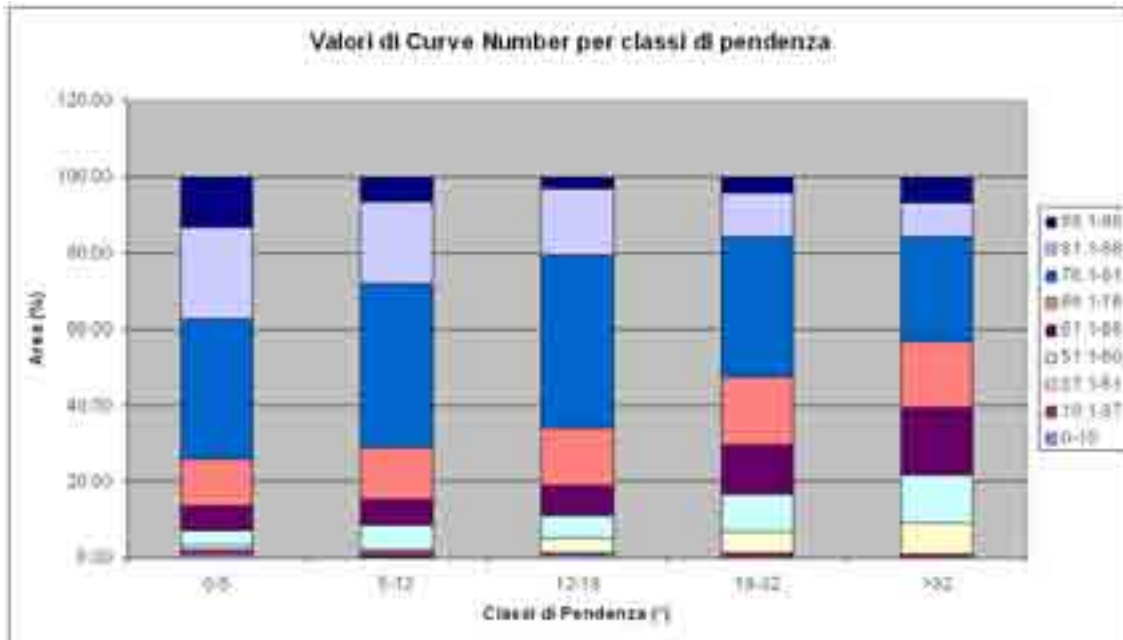


(a) Area espressa in percentuale (%)

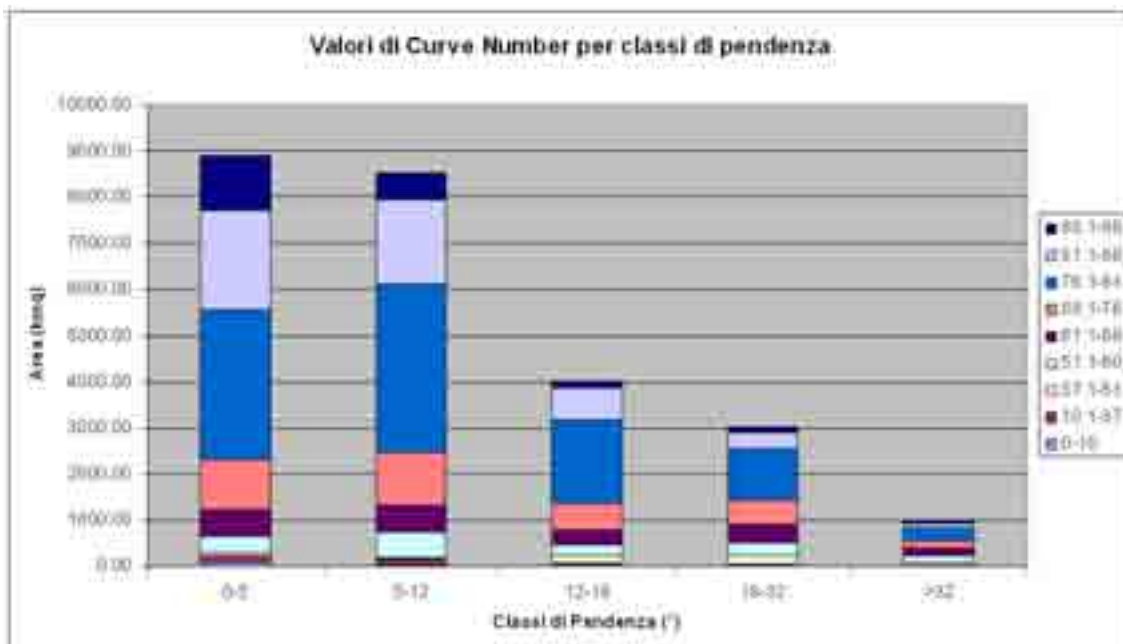


(b) Area espressa in  $km^2$

**Figura 3.2:** Distribuzione dell'uso del suolo per classe di pendenza

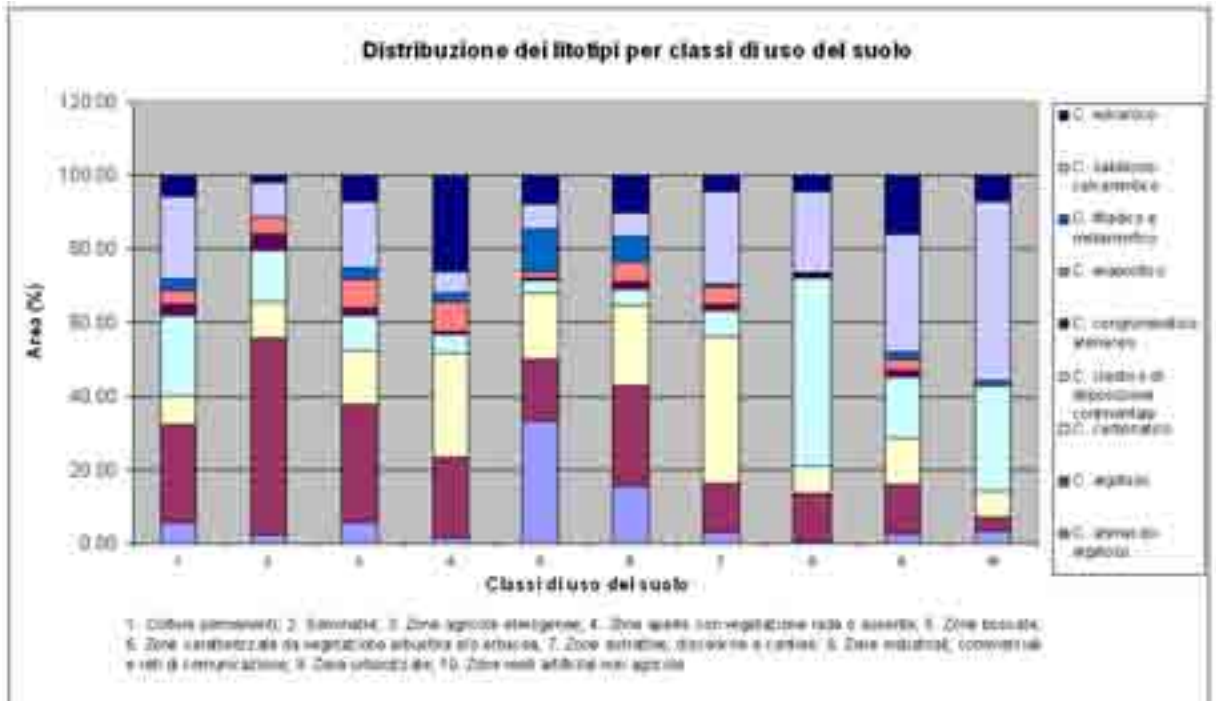


(a) Area espressa in percentuale (%)

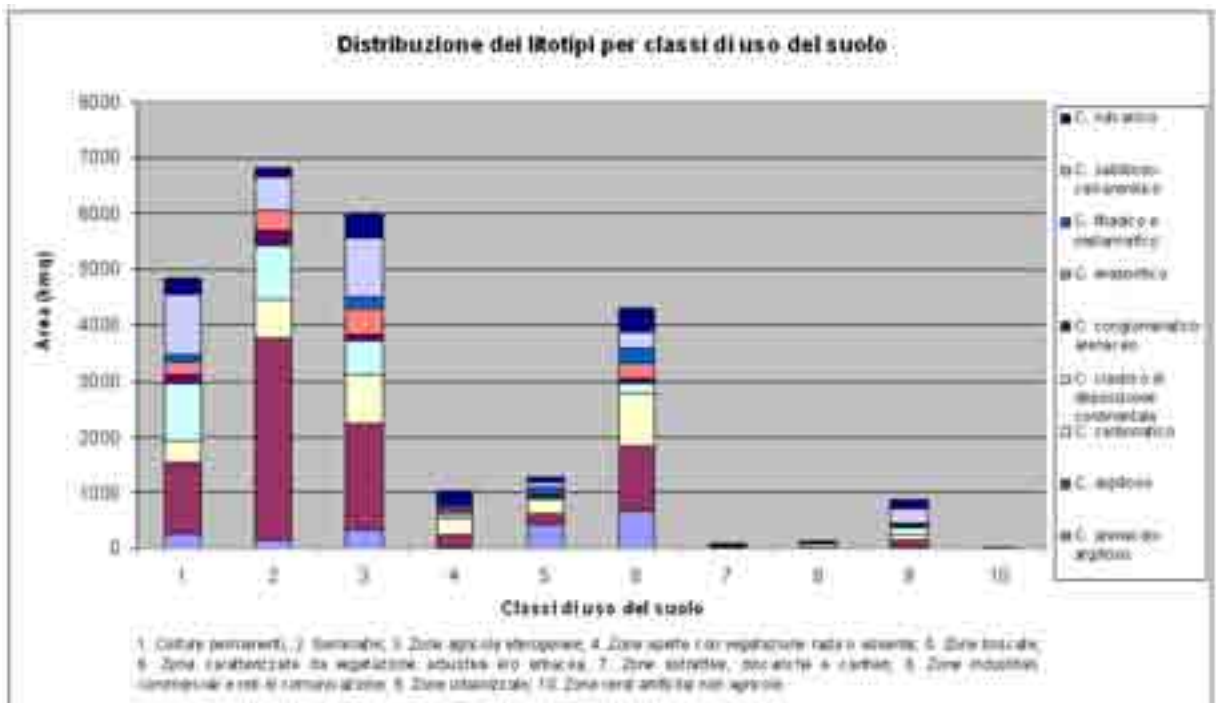


(b) Area espressa in  $km^2$

Figura 3.3: Distribuzione dei valori di Curve Number per classe di pendenza

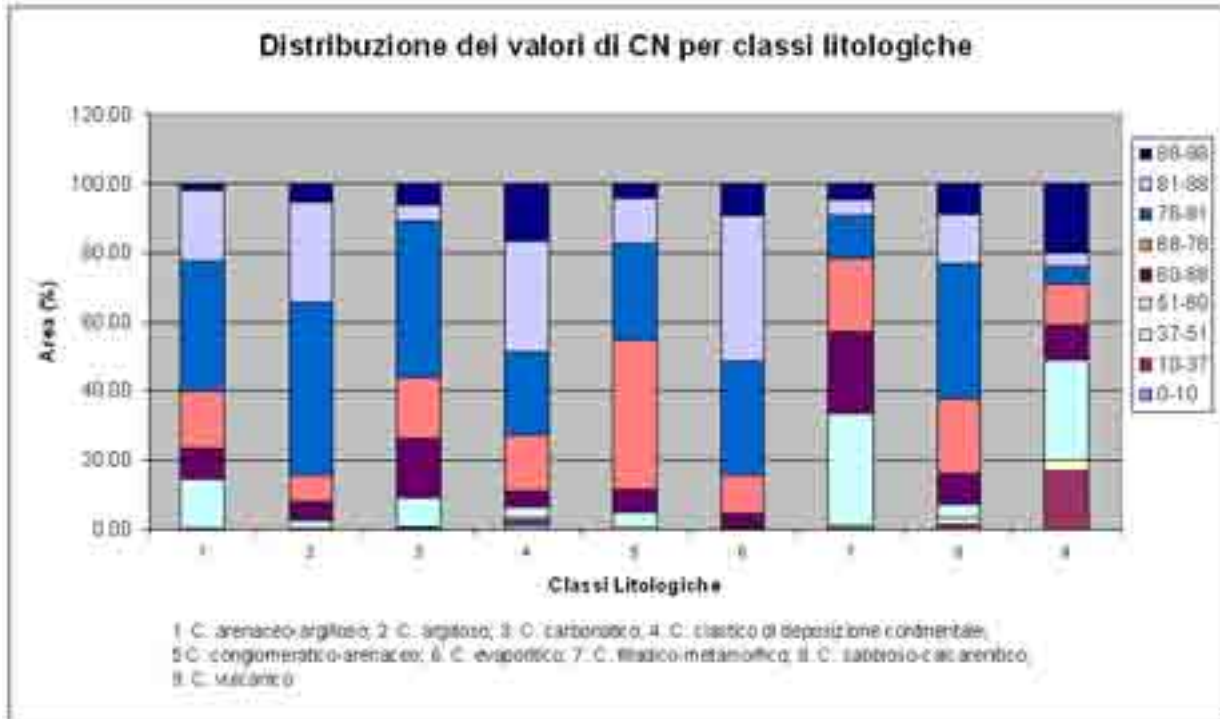


(a) Area espressa in percentuale (%)

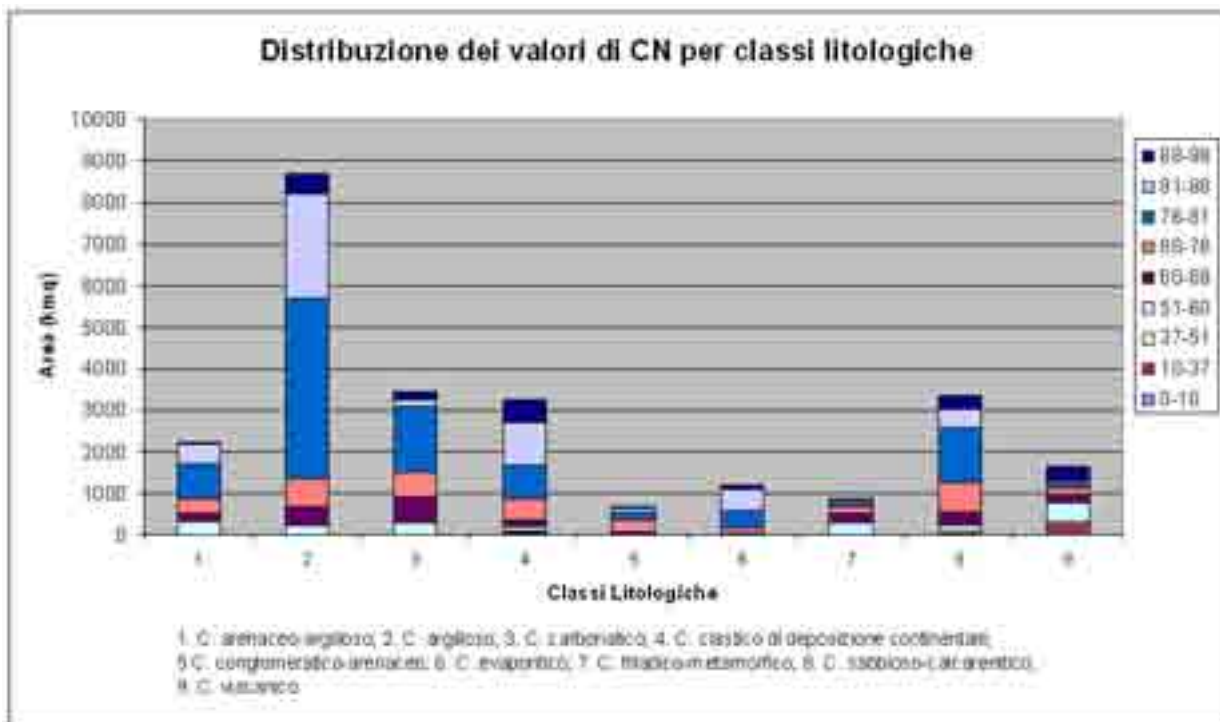


(b) Area espressa in km<sup>2</sup>

Figura 3.4: Distribuzione dei litotipi per classi di uso del suolo



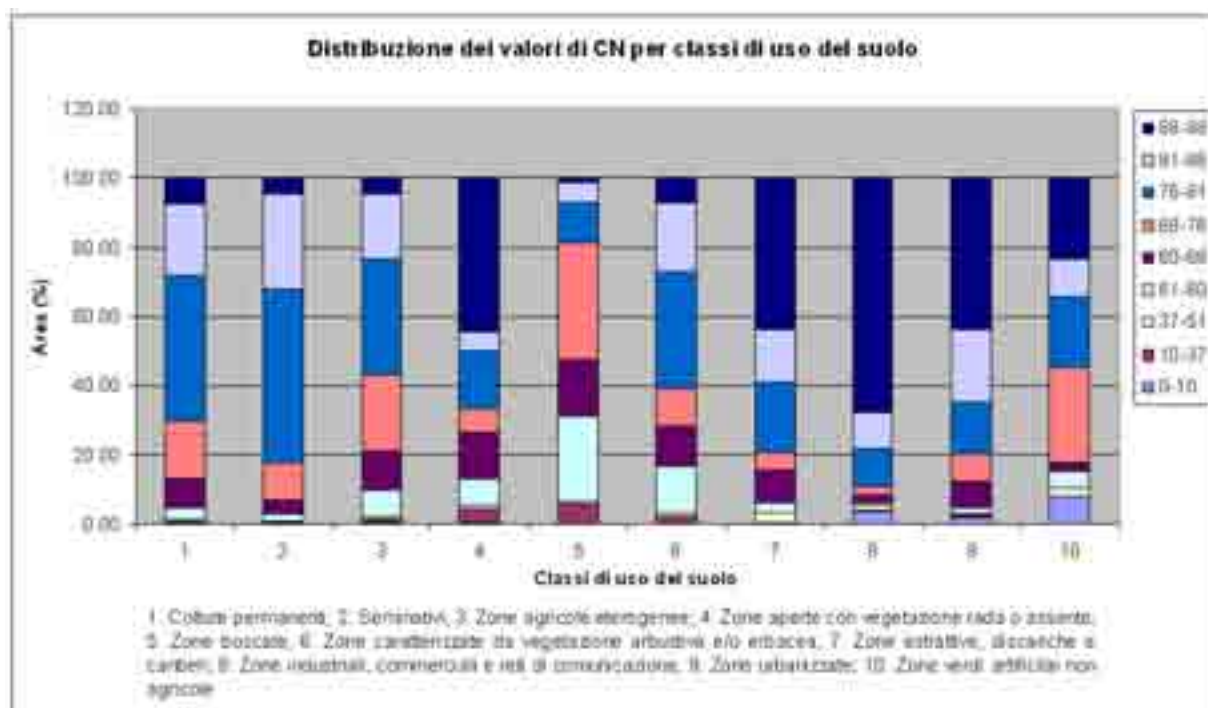
(a) Area espressa in percentuale (%)



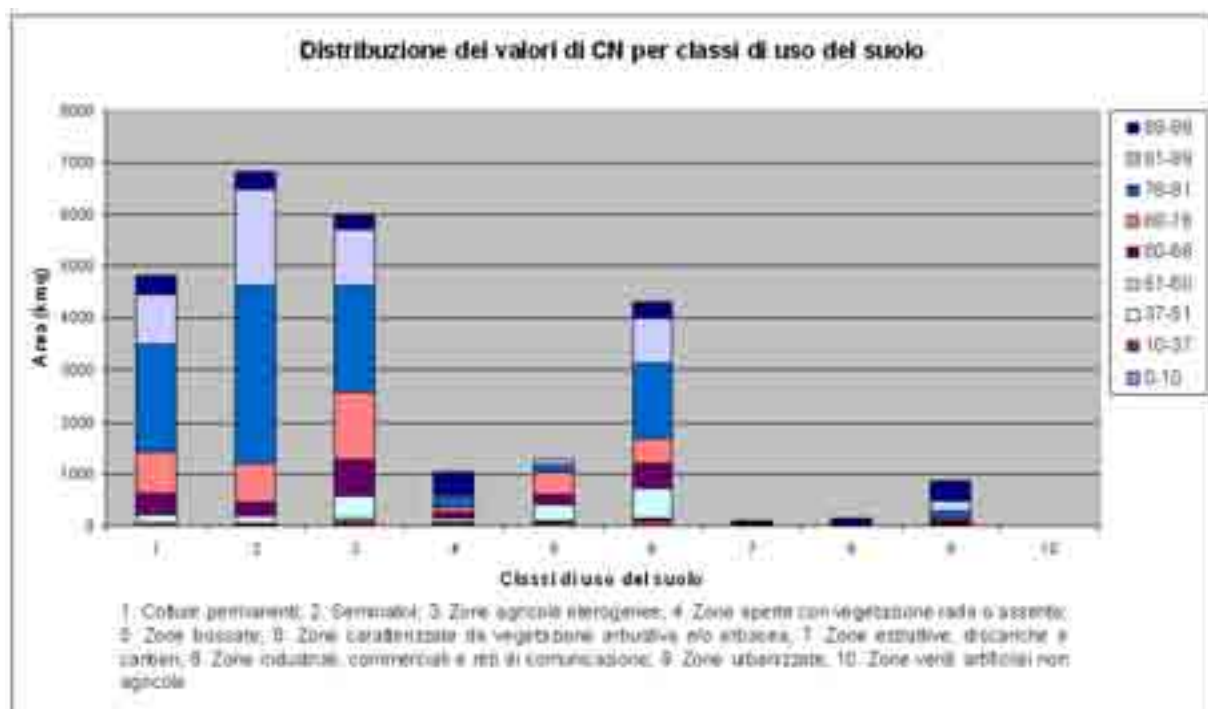
(b) Area espressa in  $km^2$

Figura 3.5: Distribuzione dei valori di CN per classi litologiche





(a) Area espressa in percentuale (%)



(b) Area espressa in  $km^2$

**Figura 3.6:** Distribuzione dei valori di CN per classi di uso del suolo

## 3.2 Correlazione fra parametri predisponenti e franosità

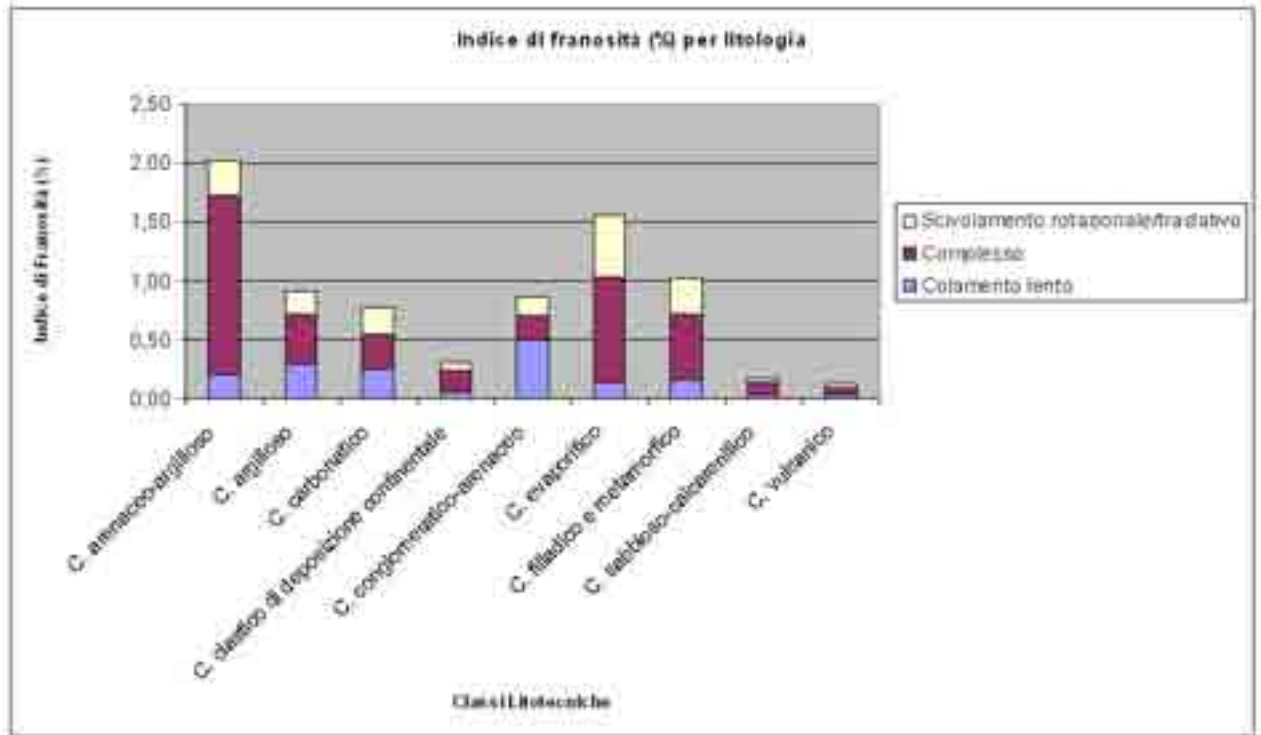
### 3.2.1 Litologia

La tabella 3.1 e l'istogramma di figura 3.7, con in ascissa le classi litotecniche e in ordinata l'indice di franosità espresso in percentuale (rapporto fra l'area in frana all'interno di una classe litologica e l'area totale della stessa classe litologica), presentano significativi valori di suscettibilità di frana nelle litologie di tipo flyschoidi sia pelitiche che arenacee, come i complessi argillosi e arenaceo-argillosi, i quali sono largamente diffusi su tutta l'area.

Infatti per questi complessi litologici l'elemento caratterizzante del comportamento meccanico è costituito dall'estrema variabilità della coesione e della resistenza al taglio, che si osserva in funzione del contenuto in acqua. I terreni argillosi riescono infatti a contenere molta acqua, ma non consentono che la stessa circoli. La presenza di acqua all'interno della struttura dei terreni argillosi determina una diminuzione del loro grado di coesione (evidenziabile attraverso la definizione del loro limite di plasticità e liquidità) e di resistenza al taglio. In pratica si passa da un comportamento da complesso semicoerente, in condizioni di bassa saturazione, ad un comportamento quasi da fluido visco-plastico, per contenuti in acqua elevati. Quest'ultima condizione è quella resa evidente dalle deformazioni di tipo complesso (evolventi a colata) e di tipo colamento lento, largamente riscontrate nel territorio in esame.

Complesso litologico	n. frane	Area classe litologica ( $km^2$ )	Area Scarpata in frana ( $km^2$ )	Indice di franosità rispetto alla classe litologica (%)
C. arenaceo-argilloso	284	2217	45	2.03
C. argilloso	1109	8705	79	0.91
C. carbonatico	196	3469	27	0.78
C. clastico di deposizione continentale	99	3246	10	0.31
C. conglomeratico-arenaceo	153	691	6	0.87
C. evaporitico	150	1220	19	1.56
C. filladico e metamorfico	180	882	9	1.02
C. sabbioso-calcarenitico	75	3352	6	0.18
C. vulcanico	38	1646	2	0.12

**Tabella 3.1:** Indice di franosità per litologia espresso solo sulle aree di scarpata



**Figura 3.7:** Indice di franosità (%) per litologia espresso solo sulle aree di scarpata

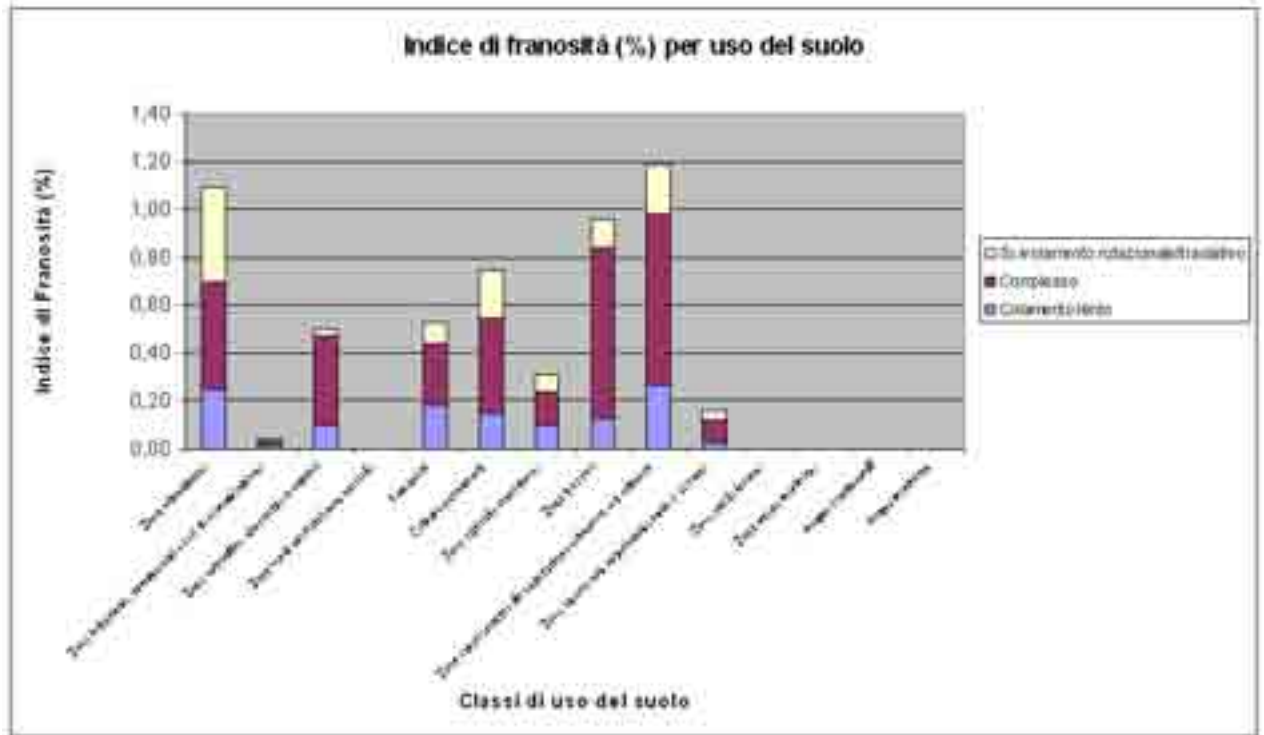
Indici di franosità altrettanto significativi sono stati riscontrati anche nel complesso evaporitico e nel complesso filladico metamorfico. Il complesso evaporitico ricopre quasi il 5% dell'area totale presentandosi con rocce gessose macrocristalline in livelli di spessore variabile, quasi mai puri, ma spesso associati ad intercalazioni argillose depositatesi in origine in zone a forte evaporazione. Questa forte componente argillosa potrebbe essere il fattore responsabile dell'alto valore percentuale di indice di franosità presente in questa classe. Per quanto riguarda il complesso filladico metamorfico, questo non può essere considerato statisticamente attendibile data la sua scarsa estensione areale, infatti è presente per solo il 3.4% dell'area totale.

### 3.2.2 Uso del Suolo

La tabella 3.2 e l'istogramma di figura 3.8 mostrano gli indici di franosità delle diverse tipologie di frana per classe di uso del suolo.

Uso del Suolo	n. frane	Area classe uso del suolo ( $km^2$ )	Area Scarpata in frana ( $km^2$ )	Indice di franosità rispetto alla classe uso del suolo (%)
Zone urbanizzate	132	862	9.40	1.09
Zone industriali, commerciali e reti di comunicazione	1	131	0.06	0.05
Zone estrattive, discariche e cantieri	6	83	0.42	0.51
Zone verdi artificiali non agricole	0	11	0	0
Seminativi	480	6803	35.97	0.53
Culture permanenti	577	4824	36.11	0.75
Zone agricole eterogenee	330	5997	18.87	0.31
Zone boscate	170	1287	12.36	0.96
Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	573	4307	51.02	1.18
Zone aperte con vegetazione rada o assente	15	1051	1.65	0.16
Zone umide interne	0	2	0	0
Zone umide marittime	0	16	0	0
Acque continentali	0	53	0	0
Acque marittime	0	1	0	0

**Tabella 3.2:** Indice di franosità per uso del suolo espresso solo sulle aree di scarpata



**Figura 3.8:** Indice di franosità (%) per uso del suolo espresso solo sulle aree di scarpata

La categoria con più alto indice di franosità è quella relativa alle zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea. Con un indice di franosità leggermente minore ma comunque significativo troviamo, pur avendo scarsa incidenza sul totale areale (meno del 4%), le zone urbanizzate. Questo risultato può essere dovuto all'abusivismo edilizio e all'urbanizzazione irrazionale presente in maniera preponderante in Sicilia. Se si osservano attentamente le aree vicine ai fiumi si nota facilmente un'occupazione crescente del letto di inondazione o alveo alluvionale con abitazioni e insediamenti industriali. Tutto ciò rende sempre più fragile il nostro territorio e spesso purtroppo a causa di ciò avvengono disastri come quello avvenuto in provincia di Messina nell'ottobre 2009, (fig. 3.9 e 3.10) con evidenti danni indotti alle persone e alle cose e con un bilancio finale di vittime e dispersi estremamente alto per l'intera comunità.

Con indici di franosità inferiori all'1% troviamo le zone boscate, le colture permanenti e per finire i seminativi. Anche le zone estrattive, discariche e cantieri presentano un indice di franosità inferiore all'1% ma sono, data la scarsa incidenza sul territorio (circa 1.15%), statisticamente non significative. La distribuzione statistica di tali indici ci indica che la



(a) Frane di tipo complesso (Archivio IFFI)



(b) Colata di detrito - Evento del 01 Ottobre 2009

**Figura 3.9:** Scaletta Zanclea (ME)





**Figura 3.10:** Colata di detrito (01 Ottobre 2009) - Giampileri (ME)

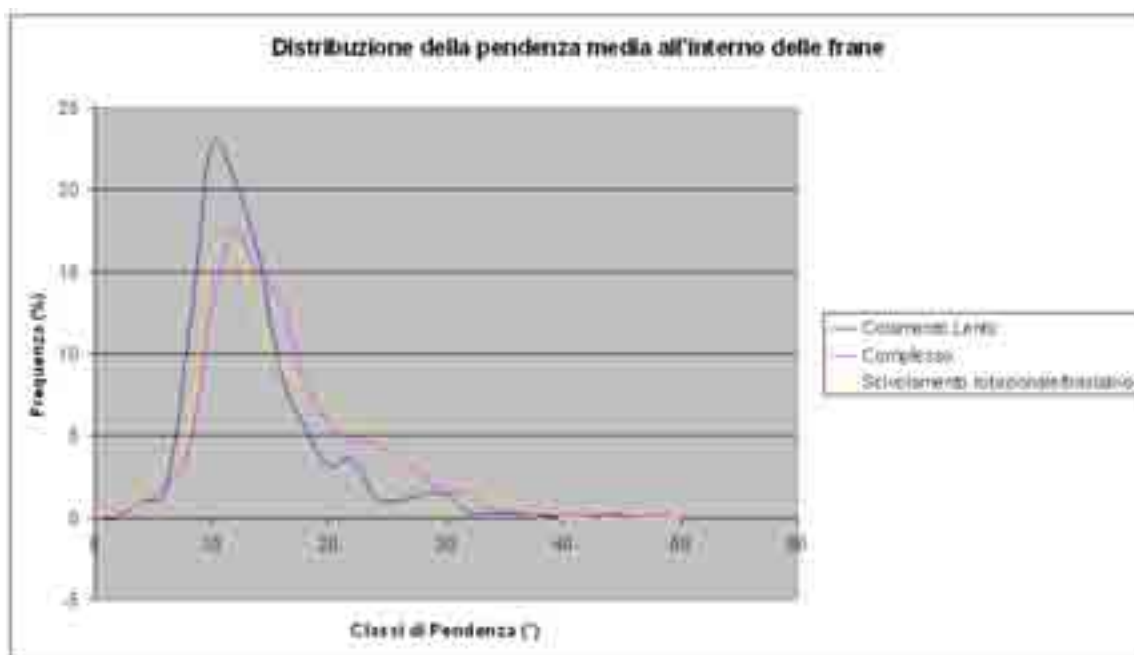
maggiore franosità si ha in corrispondenza di zone prive di vegetazione ad alto fusto; questo può essere spiegato dal fatto che la mancanza di copertura arborea determina nell'area una maggiore suscettibilità a franare, proprio perché l'impianto delle radici degli alberi agisce sul terreno con un effetto coesivo aumentandone la resistenza al taglio o anche dal fatto che dove esistono frane preesistenti probabilmente non sono presenti coperture arboree.

Questa ipotesi però non trova riscontro nel fatto che alcune zone boscate presentano anch'esse una discreta propensione al dissesto. Una possibile spiegazione per un tale risultato può essere dovuta sia alla bassa incidenza del bosco sul totale areale (7%) (fig. 6.7) sia dal fatto che il 50% dei boschi risiede su terreni di tipo argilloso, e che quindi, come più volte evidenziato, permettono l'instaurarsi di fenomeni franosi superficiali.

Da queste prime approssimative indagini non è possibile comprendere quanto le frane siano dipendenti dall'uso del suolo, o se invece entrambi i tematismi siano molto più dipendenti da altri fattori comuni come per esempio la litologia e la pendenza.

### 3.2.3 Pendenza

Si è inoltre analizzata la distribuzione di pendenza all'interno dei poligoni di frana, al fine di comprendere sotto il profilo statistico la proprietà di questo parametro per ogni tipologia di movimento. Ciò è stato possibile utilizzando gli algoritmi di analisi zonale del software ArcGIS, che permettono di calcolare la statistica delle pendenze all'interno di ogni frana a partire dalla carta inventario e dalla carta delle pendenze. I risultati (fig. 3.11), anche alla luce dei possibili rapporti tra pendenza e morfometria post-movimento (fig. 3.12), permettono di trarre alcune conclusioni preliminari. Innanzitutto si può notare che tutte e tre le tipologie di frana utilizzate nel presente lavoro (colate lente, frane complesse e scivolamenti rotazionali/traslativi) presentano, come c'era da aspettarsi, una pendenza media relativamente bassa con angoli intorno i  $10^{\circ}$ - $12^{\circ}$ .

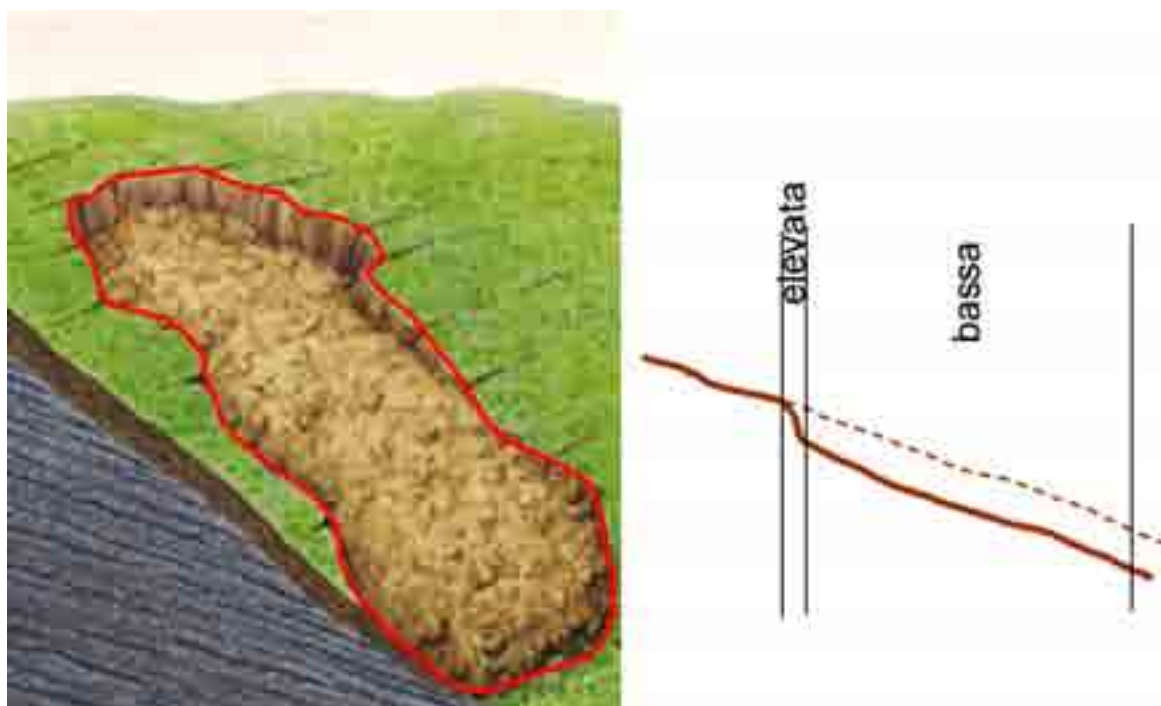


**Figura 3.11:** Distribuzione della pendenza media all'interno delle frane

Queste pendenze medie calcolate a partire dal DTM sono in buon accordo con i parametri medi di resistenza al taglio ricavati da dati presenti in letteratura, come per esempio il caso degli scivolamenti rotazionali profondi presenti nell'Appennino settentrionale, che presentano angoli di resistenza al taglio residui compresi fra  $10^{\circ}$  e  $18^{\circ}$  [35], o come le colate di terra che hanno interessato la provincia di Pistoia nel 2000, le quali si sono innescate in



terreni con angolo di attrito interno intorno a  $18^\circ$  [34]. In contesti morfometrici e geologici tipici dei movimenti lenti i valori medi di pendenza in aree di versante prive di frane rientrano generalmente nell'intervallo  $10^\circ$ - $20^\circ$ . Queste osservazioni confermerebbero l'ipotesi secondo la quale la maggior parte degli scivolamenti e delle colate lente presenti nell'area sarebbero fenomeni di riattivazione. In questo caso il fattore pendenza può essere una valida discriminante per rivelare fenomeni non mappati.



**Figura 3.12:** Variazione della pendenza in una colata

### 3.2.4 Curve Number

Sulla base delle considerazioni precedenti, un altro parametro scelto come fattore di controllo è stato il CN (Curve Number) che rappresenta una delle tecniche più utilizzate nel campo della stima dei deflussi superficiali di piena. Tale parametro, come verrà meglio esposto nel capitolo 4, rappresenta un numero adimensionale e varia da 100 (per corpi idrici e suoli completamente impermeabili) a 0 per suoli permeabili con elevati tassi di infiltrazione. Il CN è quindi essenzialmente legato alla natura del suolo, al tipo di copertura vegetale ed alle condizioni di umidità del suolo antecedenti la precipitazione.

Come chiaramente mostrato nella tabella 3.3 e nell'istogramma di figura 3.13 la maggior parte dei dissesti si colloca su valori di CN superiori a 50, valore rappresentativo del comportamento idrologico del terreno in condizione medie, raggiungendo la percentuale più alta per valori compresi tra 76 e 81. Questo risultato è confermato dal fatto che tali valori di CN cadono principalmente su terreni argillosi e arenaceo-argillosi che quindi, essendo suoli impermeabili, sono sicuramente favorevoli al ruscellamento. La tipologia di dissesti presente in maniera maggiore è quella relativa alle frane di tipo complesso subito seguita dalle colate lente, anche se come più volte ripetuto nel presente lavoro, quasi tutte le frane complesse nel territorio in esame, iniziano come scorrimenti ed evolvono in colate. La percentuale di frane presenti nei valori di CN compresi tra 0 e 50 è talmente esigua da poter essere ritenuta statisticamente irrilevante.

CN	n. frane	Area classe valori CN ( $km^2$ )	Area Scarpata in frana ( $km^2$ )	Indice di franosità rispetto alla classe uso del suolo (%)
0-10	6	133	0.03	0.02
10-37	6	348	0.13	0.04
37-51	10	172	0.18	0.10
51-60	138	1840	15.99	0.87
60-68	167	2148	14.60	0.68
68-76	381	3743	32.99	0.88
76-81	783	9586	103.55	1.08
81-88	492	5345	52.27	0.98
88-98	301	2113	24.18	1.14

**Tabella 3.3:** Indice di franosità per valori di CN sulle aree di scarpata

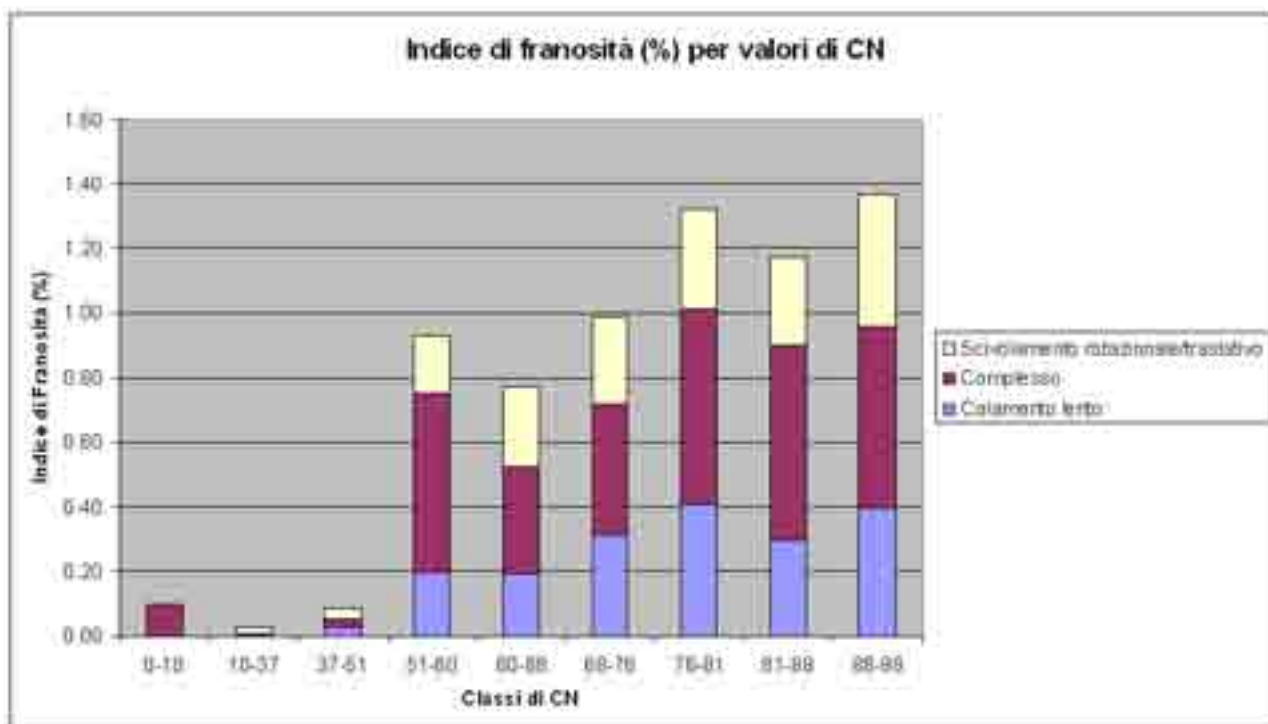


Figura 3.13: Indice di franosità (%) per valori di CN sulle aree di scarpata

### 3.2.5 Indice di anomalia Pluviometrica

Tra le cause determinanti di innesco franoso le precipitazioni rivestono un ruolo fondamentale.

Parametrizzare il fattore legato alle precipitazioni, che rappresenta una variabile di tipo temporale all'interno di modelli che lavorano solo su dati spaziali, non è sempre fattibile.

L'indice di Anomalia Pluviometrica pensato in questo lavoro può essere considerato, tra i possibili indici presenti in letteratura, come un buon compromesso.

A tal fine sono state elaborate le distribuzioni di frequenza del valore medio dell'indice di Anomalia Pluviometrica all'interno delle scarpate di frana di fenomeni a cinematica lenta e all'interno delle aree considerate (nella banca dati IFFI) come non franose.

Come si nota nel grafico di figura 3.14 le distribuzioni di frequenza presentano un picco principale a 0.47 e un picco secondario a 0.51: questo mostra una dipendenza, anche se non netta, con precipitazioni brevi e intense, in cui nell'arco delle prime tre ore di pioggia piova più del 50% della pioggia dell'intera giornata. Analizzando i grafici della figura 3.16 divisi per singola tipologia di frana si constata come le curve delle distribuzioni di frequenza per fenomeni di colamento lento (fig. 3.16a), frane complesse (fig. 3.16b) e scivolamenti rotazionali/traslativi (fig. 3.16c) confermino la presenza di un picco massimo compreso tra 0.46 e 0.47.

Di contro il grafico di figura 3.15, rappresentante la distribuzione di frequenza delle aree ad oggi considerate non in frana, presenta cinque picchi a 0.39, 0.44, 0.46, 0.48 e 0.52 tutti compresi nello stesso intervallo percentuale; ciò fa presumere che non vi è una prevalenza delle precipitazioni intense, ma che le piogge si distribuiscano uniformemente nelle ventiquattro ore.



Figura 3.14: Distribuzione di frequenza del valore medio di  $I_a$  all'interno delle scarpate di frana a cinematica lenta



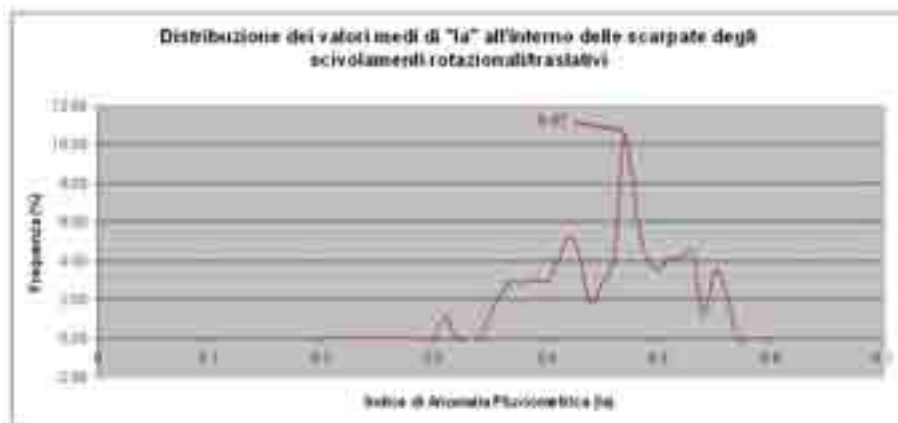
Figura 3.15: Distribuzione di frequenza del valore medio di  $I_a$  all'interno delle aree considerate nella banca dati IFFI non in frana



(a) Colamento lento



(b) Frane di tipo complesso



(c) Scivolamento rotazionale/traslattivo

**Figura 3.16:** Distribuzione di frequenza del valore medio di  $I_a$  all'interno delle scarpate di frana distinte per classe tipologica

## Capitolo 4

# Metodologie per la definizione della suscettibilità da frana

La suscettibilità da frana, o propensione al dissesto del versante, può essere definita come la componente spaziale della *pericolosità* [62] (cioè la probabilità di occorrenza di un evento potenzialmente dannoso in una data area e in un dato periodo di tempo) e fornisce la misura relativa della propensione all'innesco di un fenomeno gravitativo in una data area. Questa dipende dal grado di stabilità intrinseco del versante, espresso in funzione dei fattori pre-disponenti responsabili dell'intensità con la quale agiscono gli sforzi di deformazione. La previsione della suscettibilità consiste quindi nella stima del grado di instabilità di un versante rispetto ad un altro, senza esprimere la probabilità di occorrenza dei fenomeni franosi in termini assoluti o in senso temporale.

All'interno di una determinata area si possono distinguere aree già mappate come frane e aree libere da frane, queste ultime chiaramente rappresentano la maggior parte del territorio. La previsione di suscettibilità in aree libere da frane porta a due casi specifici:

1. propensione al dissesto in aree libere da frana a seguito di rotture di neo-formazione;
2. Individuazione di aree in dissesto non mappate nella carta inventario per mancanza dell'operatore o per cancellazione delle tracce a causa di processi naturali o antropici.

I classici fenomeni a cinematica rapida, come i crolli e le colate rapide, tipici di rotture di neo-formazione, ricadono nel primo caso; mentre fenomeni a cinematica lenta come scivolamenti e colate lente, rientrano nel secondo caso.

In Sicilia i crolli e i colamenti rapidi rappresentano solo il 9% dei dissesti, mentre i colamenti lenti, le frane complesse e gli scivolamenti rotazionali/traslativi rappresentano circa il 90% dei fenomeni franosi. Queste percentuali hanno indirizzato la realizzazione del modello di suscettibilità solo per i fenomeni a cinematica lenta, escludendo quindi i fenomeni rapidi non solo perché scarsamente rappresentativi ma anche per la carenza di dati riguardanti i fattori d'innescio. Di contro la realizzazione di un modello unico che comprendesse tutte le tipologie era impensabile per il diverso ruolo che i parametri ambientali giocano nei meccanismi di innescio.

## 4.1 Metodi di analisi della suscettibilità

I metodi per analizzare la suscettibilità da frana si possono suddividere in tre categorie:

1. **Metodi Empirici:** una mappa di suscettibilità empirica si basa su rilievi di campagna e/o fotointerpretazione i cui risultati sono poi interpretati da un esperto che indica le zone maggiormente suscettibili secondo i criteri dettati dall'esperienza, elaborando i dati (variabili indipendenti) in modi non formalizzabili. Questo metodo ha il difetto di essere soggettivo e fortemente legato alla presenza e alla qualità (non scontate) di dati di campagna; d'altra parte può prendere in considerazione particolarità e disomogeneità difficilmente modellabili.
2. **Metodi Fisicamente Basati:** i modelli fisicamente basati per l'analisi di suscettibilità da frana sono solitamente composti da un modulo geo-meccanico e uno idrologico accoppiati.
3. **Metodi Statistici:** fanno parte di questa categoria le regressioni mono o multivariate, le reti neurali e l'indicizzazione delle cause. Tutti questi metodi si basano su una banca dati di calibrazione dove si conoscono i valori delle variabili indipendenti (input e parametri) e la corrispondente variabile dipendente (output). Gli algoritmi contenuti in questi metodi ricercano le relazioni e i coefficienti ottimali che legano le variabili indipendenti a quella dipendente. Sono questi i metodi più adatti all'analisi in aree molto vaste.



### 4.1.1 Metodi Empirici

In generale, i metodi empirici dipendono quasi totalmente dal giudizio esperto della persona che effettua la valutazione di suscettibilità. I dati di ingresso sono di solito derivati dai risultati delle indagini di campagna, se possibile con il supporto della fotointerpretazione. LEROI [63] distingue l'analisi geomorfologica di campagna dalla combinazione (o sovrapposizione) di mappe indicizzate, con o senza pesi associati ai vari fattori di controllo della stabilità. L'analisi geomorfologica di campagna rappresenta probabilmente il più semplice dei metodi qualitativi: i procedimenti di stima e di zonazione vengono condotti direttamente sul campo dai rilevatori, sulla base di quanto appreso in situazioni simili, senza alcuna chiara indicazione riguardo ai criteri seguiti per il riconoscimento e la perimetrazione dell'instabilità. La carta di pericolosità deriva così, senza elaborazioni intermedie, dalla carta geomorfologica realizzata. L'estrema soggettività nella raccolta e nella cernita dei dati nonché nell'identificazione delle "regole" che governano la stabilità dei versanti rende molto difficile il confronto tra carte di suscettibilità create da differenti esperti; inoltre, l'uso di criteri impliciti non soddisfa la necessità di trasparenza che dovrebbe caratterizzare ogni procedura applicata. Quest'ultimo aspetto è particolarmente importante perché fa sì che il metodo sia poco adatto ad eventuali modifiche da apportare alla perimetrazione in conseguenza dell'analisi di nuovi dati resi disponibili. Nell'ambito dell'analisi geomorfologica di campagna, i software GIS assumono la funzione di semplici strumenti di disegno. Nel metodo di overlay cartografico, gli esperti selezionano e mappano i fattori che controllano la stabilità dei versanti e, basandosi sulla loro personale esperienza, assegnano ad ognuno di essi un valore pesato relativo e proporzionale al contributo atteso. In un recente lavoro [64] è stata adottata questa metodologia, suddividendo ogni parametro in un certo numero di classi, assegnando un peso ad ogni classe e ad ogni parametro e procedendo infine alla sovrapposizione delle mappe pesate per ottenere la carta di suscettibilità, differenziata in vari livelli. In tal modo i problemi di trasparenza del metodo vengono superati ed è possibile adoperare i GIS per eseguire in automatico le operazioni previste. Tuttavia, benché il metodo sia applicabile ad ogni scala, le operazioni da compiere presentano una certa lentezza quando si lavora su vaste aree. Inoltre, persiste in maniera preponderante la soggettività nell'attribuzione dei pesi, così come la difficoltà di estrapolare il modello in territori al di fuori della zona in studio.

### 4.1.2 Metodi Fisicamente Basati

I modelli fisicamente basati per l'analisi di suscettibilità da frana sono solitamente composti da un modulo geo-meccanico e uno idrologico accoppiati. La componente geo-meccanica degli studi di stabilità è quasi sempre una analisi all'equilibrio limite. In questo tipo di analisi si valuta il rapporto tra le condizioni instabilizzanti, o agenti, e quelle stabilizzanti, o resistenti nel versante in esame. Si definisce cioè:

$$FS = \frac{\tau_r}{\tau_a}$$

dove  $FS$  è il fattore di sicurezza,  $\tau_r$  e  $\tau_a$  sono gli sforzi di taglio lungo l'ipotetica superficie di rottura, rispettivamente resistente e agente. Quando il valore di  $FS$  raggiunge 1, il versante raggiunge l'equilibrio limite e, teoricamente, si rompe. Le espressioni di  $FS$  sono diverse a seconda delle approssimazioni che si fanno per rendere il problema determinato [65]. Una delle forme più semplici di analisi all'equilibrio limite è il *Pendio Infinito*. In questa approssimazione, valida in quei fenomeni dove la lunghezza del corpo di frana è molto maggiore della sua profondità, si trascurano le forze che si esercitano tra un concio e l'altro, la superficie di scorrimento è ipotizzata parallela al piano campagna e l'espressione di  $FS$  diventa:

$$FS = \frac{c + (H\gamma_s \cos^2(\alpha) - u) \tan(\phi)}{H\gamma_s \sin(\alpha) \cos(\alpha)}$$

dove  $c$  =coesione efficace,  $H$  =profondità dell'ipotetico piano di scorrimento,  $\gamma_s$  =peso specifico del suolo,  $\alpha$  =pendenza del versante,  $u$  =pressione neutra,  $\phi$  =angolo di attrito interno efficace.

L'accoppiamento tra la componente geo-meccanica e quella idrologica si effettua tramite l'aggiornamento della pressione neutra  $u$ . Questo valore può essere fisso nel tempo in caso di modelli stazionari, o variabile nel caso di modelli transitori.

Da quanto detto si può affermare che i modelli fisicamente basati necessitano di algoritmi troppo onerosi per essere applicati su un'area estesa quanto quella studiata nel presente lavoro o meglio ad oggi non esistono lavori del genere. Non è detto però che in futuro con l'utilizzo di calcolatori sempre più potenti questo non sia possibile.

### 4.1.3 Metodi Statistici

La suscettibilità al rischio da frana può essere studiata su diverse scale areali, che solitamente sono di competenza di diversi approcci modellistici. Come visto precedentemente, aree molto estese, dell'ordine delle migliaia di chilometri quadrati, sono studiabili, con i mezzi attuali, solo utilizzando un metodo statistico. Nel presente lavoro, la suscettibilità al rischio è stata analizzata a scala regionale, tramite metodi esclusivamente statistici.

Tali metodi si basano sulle relazioni esistenti tra i fenomeni franosi e fattori predisponenti l'instabilità, attraverso l'attribuzione di pesi che riflettono l'influenza che ognuno di questi esercita sulla stabilità/instabilità del versante. I pesi vengono attribuiti in maniera oggettiva e ripetibile garantendo quindi un minore grado di soggettività rispetto ai metodi empirici.

Uno dei difetti principali dei metodi statistici [66] è la necessaria presenza di dati sperimentali per la loro applicazione e quindi la bontà del loro risultato è fortemente dipendente dalla qualità, dalla quantità e dalla varietà di questi ultimi.

Come vedremo nel capitolo 5, una buona carta inventario dei fenomeni franosi sta alla base di questa modalità di valutazione; successivamente devono essere individuati e definiti i parametri che esprimono i fattori di controllo della franosità, sulla base dei modelli geomorfologici interpretativi, i quali sono trasformati in layers tematici in formato GRID e raccolti in ambiente GIS.

L'analisi statistica può essere univariata o multivariata. L'analisi statistica univariata confronta ogni singolo fattore della franosità, precedentemente scelto, con la carta inventario, trascurando la possibilità che i fattori di franosità possano avere una interazione reciproca più o meno importante. L'applicazione dell'analisi statistica multivariata prevede, invece, l'individuazione di criteri di classificazione delle unità di mappatura che dipendono dalla combinazione di tutti i fattori di controllo [67]. In entrambi i casi, la funzione utilizzata per rappresentare la correlazione probabilistica tra fattori di controllo e franosità è la densità di frana. Sulla base dei valori di densità di frana riscontrati per ciascun valore dei singoli fattori, nel caso univariato, o della combinazione dei fattori, nel caso multivariato, è possibile estendere le condizioni di suscettibilità da frana, riscontrate nelle aree in dissesto, anche a quelle che presentano le stesse condizioni, cioè dove vengono riconosciute condizioni predisponenti per situazioni future di instabilità. Tale estensione è basata sul criterio che prevede che le nuove attivazioni si verificheranno nelle stesse condizioni per le quali

si sono verificate nel passato. La procedura viene conclusa con la fase di validazione del modello, nella quale si confrontano i risultati sintetizzati dalla carta di suscettibilità con la distribuzione spaziale delle aree in dissesto.

## 4.2 Metodi di valutazione dei risultati dei modelli

I risultati di un modello devono essere confrontati con una realtà, che può essere un'interpretazione di dati sperimentali o i risultati di un altro modello. Si definisce *Previsione* il risultato del modello (il termine implica una valutazione temporale, ma si può applicare anche all'analisi di suscettibilità, che ha come risultato l'indicazione delle aree soggette alle future frane) e *Osservazione* la mappa della realtà con cui si vuole confrontare il modello: il rapporto tra *Previsione* e *Osservazione* può essere analizzato con una *Tabella di Contingenza*. Le tabelle di contingenza sono tabelle utilizzate in statistica per rappresentare e analizzare le relazioni tra due o più variabili. In esse si riportano le numerosità congiunte delle variabili. Il caso più semplice è quello delle tabelle tetracoriche, in cui ciascuna delle due variabili assume solo due possibili valori. Nel nostro caso le due variabili sono *Previsione* e *Osservazione* e i due valori che ognuna di queste può assumere sono *Stabile* e *Instabile*. Così come si vede in tabella 4.1, si definisce *Sensitività* ( $Se$ ) la percentuale di esempi in frana correttamente classificati, cioè ( $Se = \frac{VP}{VP+FN}$ ) e *Specificità* ( $Sp$ ) la percentuale di casi non in frana correttamente classificati, cioè ( $Sp = \frac{VN}{VN+FP}$ ).

Previsto - Osservato		Totale
Veri Positivi ( $VP$ )	Veri Negativi ( $VN$ )	Sensitività ( $Se$ )
Falsi Negativi ( $FN$ )	Falsi Positivi ( $FP$ )	Specificità ( $Sp$ )

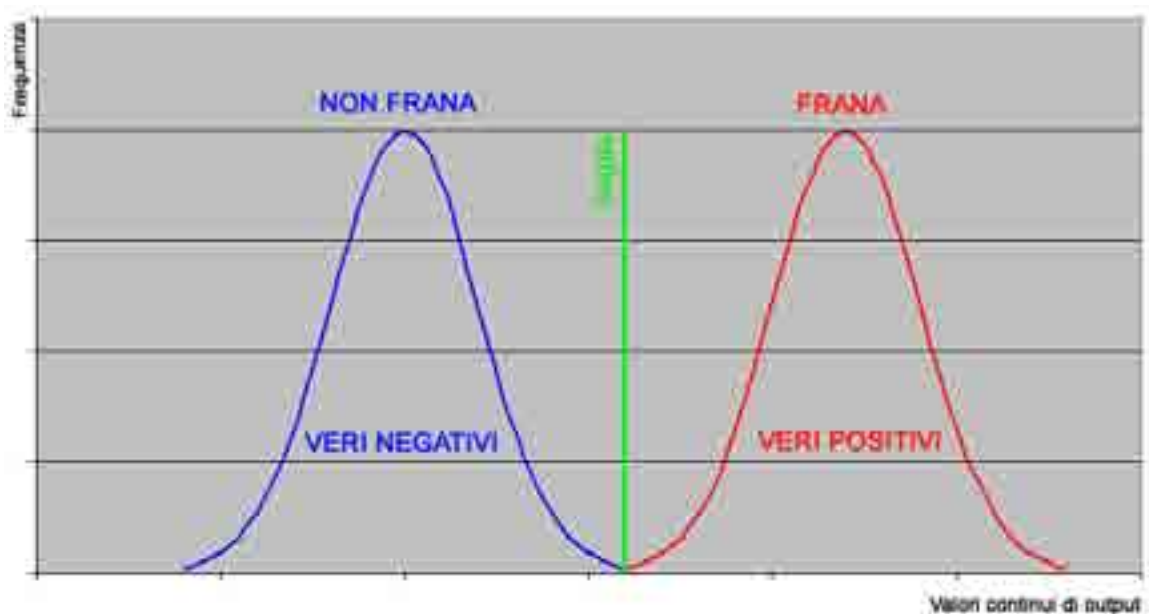
**Tabella 4.1: Tabella di Contingenza:** Previsto-Osservato: (*Veri Positivi* = area prevista instabile ed effettivamente osservata instabile, *Veri Negativi* = Area prevista stabile ed effettivamente osservata stabile, *Falsi Negativi* = area prevista stabile ma osservata instabile, *Falsi Positivi* = Area prevista instabile ma osservata stabile).

Vale la pena sottolineare l'importanza di considerare entrambi i valori  $Se$  e  $Sp$  per avere un quadro comprensibile del funzionamento del modello: non ha senso dire "il modello prevede l'80% delle frane" senza specificare quanti sono i casi in cui la previsione non è corretta. Sia  $Se$  che  $Sp$  dipendono dalla scelta dei parametri del modello e solo la loro

analisi congiunta permette di valutare i risultati. Nel presente studio è stato adottato come sistema di valutazione l'area sottesa dalla curva "ROC area", come la curva ottenuta graficando la  $Se$  in relazione alla  $Sp$  al variare dei parametri del modello. La curva di ROC varia tra 0 e 1, dove con  $ROC = 1$  si ha la previsione perfetta e con  $ROC = 0$  la previsione completamente sbagliata, infine per  $ROC = 0.5$  si ha la previsione casuale. Molti analisti concordano nel dare a ROC il significato di probabilità che una nuova entità sia classificata correttamente dal modello [68, 69].

### La curva ROC (Receiver Operating Characteristic)

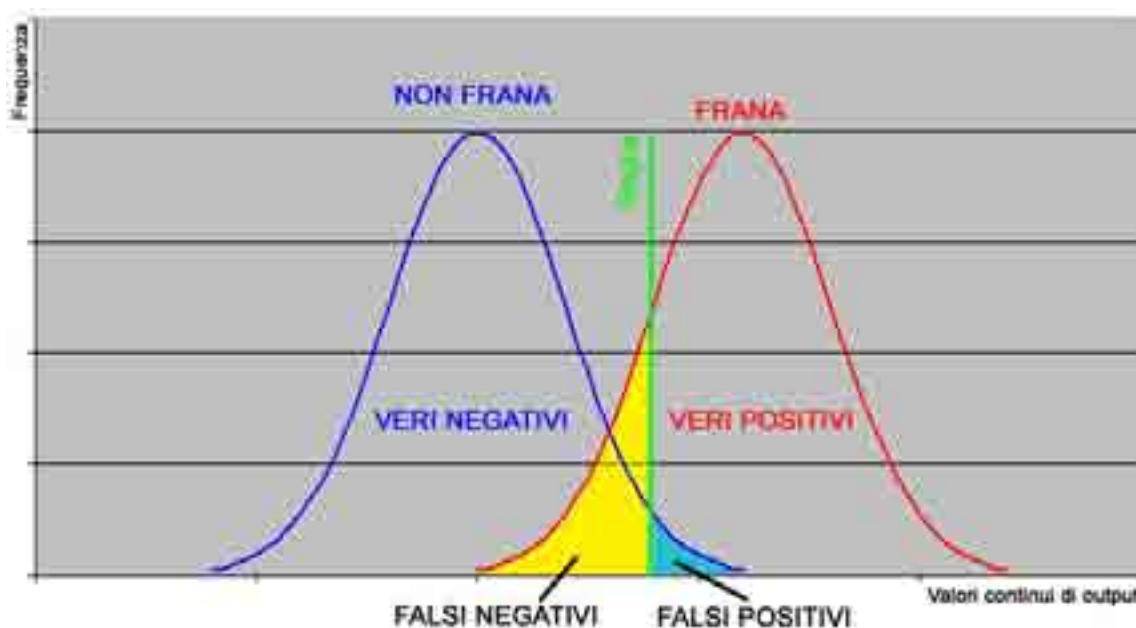
Il problema di base che genera incertezza nell'interpretazione dei risultati di classificazione di un modello risiede nel fatto che nella maggioranza dei casi esiste una zona di sovrapposizione fra le distribuzioni dei risultati, che generalmente sono valori continui. Infatti, se le due classi risultassero perfettamente separate (fig. 4.1), sarebbe molto semplice individuare il valore soglia ottimale da utilizzare per discriminarle con assoluta precisione.



**Figura 4.1:** Distribuzione dei valori in uscita da un ipotetico modello nelle classi *frana-non frana*, senza zona di sovrapposizione tra le classi.

Nella realtà, invece, si verifica sempre una sovrapposizione più o meno ampia delle due distribuzioni (fig. 4.2), ed è perciò impossibile individuare sull'asse delle ascisse un valore

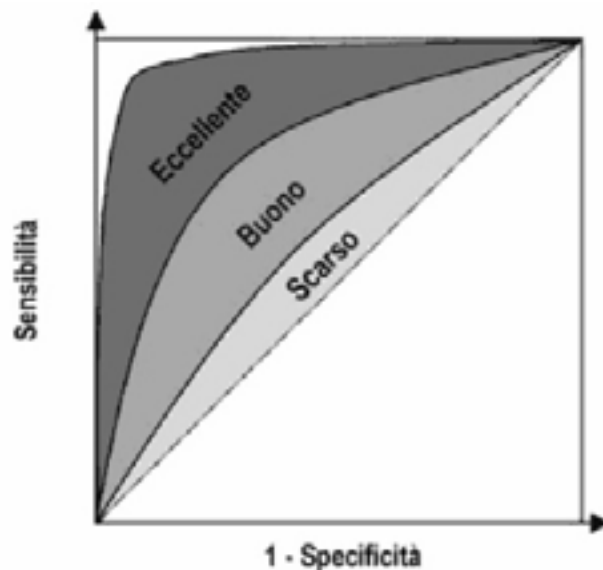
soglia che consenta una classificazione ottimale, tale da azzerare i falsi positivi ed i falsi negativi.



**Figura 4.2:** Distribuzione dei valori in uscita da un ipotetico modello nelle classi *frana-non frana*, con sovrapposizioni tra le classi.

La scelta del valore soglia non può essere dettata soltanto da considerazioni di ordine probabilistico volte a minimizzare la proporzione di classificazioni errate, poiché in diversi ambiti, tra cui l'analisi di suscettibilità, gli errori commessi nella classificazione di casi positivi e negativi possono avere valenze differenti. Classificare come suscettibile a frana un'area che non lo è, ha sicuramente meno conseguenze negative che non definire sicura un'area che ha buone probabilità di franare. L'obiettivo della classificazione è dunque quello di minimizzare i falsi negativi, e dunque di ottenere un'alta sensibilità. Per selezionare il valore soglia in grado di ottimizzare una classificazione, è necessario osservare come variano le misure di prestazione al variare di questa soglia. Il grafico di *ROC (Receiver Operating Characteristic)* (fig. 4.3) è la rappresentazione di questa relazione. Il grafico si ottiene riportando in ascissa i valori  $(1 - Sp)$ , e in ordinata i corrispondenti valori di  $Se$ , ed evidenzia quindi l'andamento dei casi positivi correttamente individuati ( $Se$ ) rispetto ai falsi positivi  $(1 - Sp)$ . Sensibilità e Specificità vengono calcolati per valori soglia differenti, nello specifico per tutti i valori soglia possibili, e riportati in grafico. L'unione dei punti

ottenuti riportando nel piano cartesiano ciascuna coppia ( $Se$ ) e  $(1 - Sp)$  per diversi valori di soglia, genera una curva spezzata con andamento a scaletta (*ROC plot*). Per interpolazione, è possibile eliminare la scalettatura (smoothing) ed ottenere la curva di *ROC*, che rappresenta una stima basata sui parametri del data set sperimentale.



**Figura 4.3:** Curva di ROC

È immediato osservare come i due parametri siano inversamente correlati. In altre parole, l'adozione di una soglia che offre un'elevata  $Se$  comporta una perdita di  $Sp$  e viceversa. La curva permette di individuare la soglia migliore da utilizzare al fine di ottenere il compromesso desiderato tra la percentuale sovrastimata di aree in frana ed i falsi negativi che si è disposti a tollerare. Come regola generale, si può affermare che il punto sulla curva *ROC* più vicino all'angolo superiore sinistro rappresenta il miglior compromesso fra *sensibilità* e *specificità*, e che quindi sia da preferire il valore soglia ad esso associato. Tuttavia, in condizioni ottimali, la procedura di selezione del valore soglia consiste in un percorso decisionale molto più complesso.

L'area sottesa dalla curva di *ROC*, è una misura della qualità della discriminazione tra le classi e dell'accuratezza del classificatore. Risulta quasi sempre necessario testare la capacità discriminante del test, ovvero se l'area sotto la curva eccede significativamente il suo valore atteso di 0.5. Tale procedura corrisponde a verificare se la proporzione dei veri positivi è superiore a quella dei falsi positivi.

La capacità del classificatore di distinguere e separare le due classi è visualizzata nella pendenza del primo tratto della curva. Più questa è alta, infatti, più la *sensitività* sarà alta a parità di *specificità*.



## Capitolo 5

# Acquisizione della carta inventario dei fenomeni franosi

La carta inventario è il mezzo più semplice di rappresentazione cartografica dei fenomeni franosi [19]. In essa è riportata la localizzazione di tutti gli eventi franosi osservabili alla scala del lavoro che hanno lasciato segni visibili sul territorio.

Essa costituisce l'elemento conoscitivo determinante per la ricerca delle relazioni che legano le frane ai fattori d'innescò e ai fattori predisponenti caratteristici del territorio in esame.

Questo tipo di elaborato rappresenta una prima approssimativa stima della pericolosità relativa ai movimenti franosi, poiché pone l'attenzione sugli effetti dell'instabilità di versante piuttosto che sui processi e le condizioni che li causano [20].

Le carte inventario possono essere realizzate con tecniche diverse a seconda della scala, dello scopo e delle risorse finanziarie disponibili [21]. Le carte a piccola e piccolissima scala (minore di 1:100000) sono generalmente preparate usando dati bibliografici, ma esistono anche esempi di carte a scala 1:500000 ottenute attraverso l'interpretazione di fotografie aeree [22]. Le carte a media scala (comprese fra 1:100000 e 1:50000) sono normalmente redatte attraverso un esteso lavoro di interpretazione di fotografie aeree a scala compresa fra 1:60000 ed 1:20000, con controlli in campagna generalmente limitati [23]. Le carte a grande e grandissima scala (maggiore di 1:50000) vengono preparate solo per aree limitate, utilizzando l'interpretazione di più serie di fotografie aeree a scala generalmente maggiore di 1:20000, nonché estesi e dettagliati controlli in campagna.

A seconda della scala e delle procedure utilizzate per la loro preparazione, le carte inventario hanno obiettivi e campi di applicazione assai diversi.

Per esempio le carte a grande e grandissima scala sono comunemente utilizzate per mappare movimenti franosi occorsi durante un singolo evento catastrofico, quale un'alluvione o un terremoto [24] o per mappare con grande dettaglio singoli eventi franosi, per scopi applicativi e per produrre modelli di pericolosità di frana.

Si comprende facilmente come la carta inventario assuma un'importanza strategica nello studio della pericolosità da frana; errori commessi nella realizzazione di questa difficilmente potranno essere corretti nelle successive fasi di lavoro.

Per quanto riguarda questo lavoro, essendo l'estensione dell'area oggetto di studio l'intera regione Sicilia, è stato impossibile fotointerpretare immagini aeree o addirittura recarsi in campagna per indagini dirette sul campo sia per mancanza di tecnici sia perché il lavoro doveva essere portato a termine in tempi ragionevoli. Per questo motivo la carta inventario utilizzata nel presente progetto è quella redatta all'interno del progetto IFFI.

## 5.1 Il Piano di Assetto Idrogeologico (PAI)

La Legge 183/89 all' art 17 comma 1, definisce il Piano di Bacino come “piano territoriale di settore” e “strumento conoscitivo, normativo e tecnico-operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni e le norme d'uso finalizzate alla conservazione, alla difesa e alla valorizzazione del suolo e la corretta utilizzazione delle acque, sulla base delle caratteristiche fisiche ed ambientali del territorio interessato”. Il Piano, in quanto strumento conoscitivo, delinea il quadro complessivo di informazioni, opportunamente raccolte ed organizzate, in continuo aggiornamento ed ampliamento, dal quale emergono le criticità, le situazioni di emergenza ambientale e le risorse; per quanto riguarda invece il ruolo di strumento programmatico, al Piano compete la definizione di norme e prescrizioni per la difesa e valorizzazione del suolo e delle acque e l'elaborazione di programmi di intervento, sulla base delle priorità e dei fondi disponibili.

Il PAI, ovvero Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico, contiene l'individuazione e la perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico; con il termine “rischio idrogeologico” si intende, seppur impropriamente, sia il rischio idraulico sia il rischio dovuto all'instabilità dei versanti. Per rendere più omogenei possibile gli elaborati delle varie Autorità di bacino, il D.P.C.M. 29/9/98 delinea i criteri generali per la perimetrazione delle aree a rischio, specificando anche una metodologia di lavoro per l'immediato, e quindi suscettibile di modifiche e miglioramenti, dettati dal progredire delle conoscenze.

I criteri proposti prevedono quattro classi di rischio: “R4-R3-R2-R1” da identificare attraverso un procedimento articolato secondo tre fasi successive:

1. Individuazione delle aree soggette a rischio idrogeologico, attraverso la raccolta di tutte le informazioni esistenti sul dissesto. Tale fase implica l'esecuzione di una ricerca storica e bibliografica sui dissesti idrogeologici presenti sul territorio, la realizzazione di cartografie dei fenomeni di dissesto (carta delle frane, carta delle aree inondabili), l'individuazione delle opere di mitigazione esistenti nonché degli elementi antropici (persone, insediamenti, infrastrutture, attività socio-economiche) e dei beni ambientali suscettibili di rischio.
2. Perimetrazione e valutazione dei livelli di rischio, con conseguente definizione delle misure di salvaguardia. Devono essere perimetrate aree che evidenziano diversi livelli di rischio, così definiti:

- (a) *(R4) - Rischio Molto Elevato*: è possibile la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi a edifici, infrastrutture e beni ambientali, distruzione di attività economiche;
- (b) *(R3) - Rischio Elevato*: problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali a edifici e infrastrutture con conseguente inagibilità, interruzione di attività economiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale;
- (c) *(R2) - Rischio Medio*: danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale, senza pregiudizio per l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche;
- (d) *(R1) - Rischio Moderato*: danni sociali, economici e ambientali marginali.

Per giungere a questo tipo di perimetrazioni devono essere individuati gli elementi a rischio, suddivisi per categorie (strade, complessi abitativi, etc.) e devono essere valutati i livelli di pericolosità dei fenomeni di dissesto, in termini sia di probabilità di accadimento sia di intensità.

3. Pianificazione della mitigazione del rischio. Vengono individuate le prescrizioni da attuare nelle aree a rischio e devono essere previsti gli interventi rivolti alla mitigazione dello stesso o alla rimozione dello stato di pericolosità, in base alle priorità stabilite dal Piano.

La Sicilia nell'ambito dell'attività di studio del territorio e pianificazione degli interventi, così come definito dal decreto legge n. 132/99, a partire dal 1999 ha avviato la propria azione pianificatoria in materia di rischio geomorfologico predisponendo il Piano Straordinario "Individuazione e perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico molto elevato ed elevato" ai sensi art. 1 comma 1 bis D.L.180/98, approvato con Decreto dell'Assessore Regionale per il Territorio e l'Ambiente, n. 298/XLI del 4/7/2000.

La prima fase relativa alla costruzione della struttura principale è stata ultimata alla fine del 2004 ed è consultabile sul nuovo portale WebGIS del SITR (Sistema Informativo Territoriale Regionale) all'indirizzo: <http://88.53.214.52/sitr/services/PAI/MapServer/WMSServer>.

## **5.2 Il progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia)**

L'evento disastroso del 5 maggio 1998, che ha colpito severamente i comuni di Sarno, Siano, Quindici, Bracigliano e San Felice a Canello nelle province di Salerno, Avellino e Caserta, ha determinato un nuovo impulso alle attività di conoscenza, pianificazione territoriale e riduzione del rischio da frana e idraulico, coinvolgendo tutte le strutture dello Stato, nazionali e locali, con competenze nel campo della difesa del suolo. In tale ambito è nato nel 2000 il progetto nazionale IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), a seguito di una convenzione siglata dalle regioni italiane e dall'APAT, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e dei Servizi Tecnici (ex Servizio Geologico nazionale oggi in ISPRA).

La metodologia adottata per realizzare l'inventario si basa sulla raccolta dei dati storici e d'archivio, sull'aerofotointerpretazione e sui rilievi sul terreno. Al fine di ottenere una omogeneità a livello nazionale, è stata predisposta la Scheda Frane IFFI sulla base di standard internazionali di classificazione e nomenclatura. La Scheda Frane è articolata su tre livelli di approfondimento progressivo:

1. livello I: contiene le informazioni di base (ubicazione, tipologia del movimento, stato di attività) ed è obbligatorio per ogni frana;
2. livello II: raccoglie i parametri morfometria, geologia, litologia, uso del suolo, cause, data di attivazione;
3. livello III: contiene informazioni su danni, indagini e interventi di sistemazione.

La Banca Dati è costituita da una cartografia informatizzata alla scala 1:25000 o a scale di maggior dettaglio e dal relativo database alfanumerico e iconografico. Ogni fenomeno franoso è rappresentato da:

- un punto georeferenziato posto, per convenzione, in corrispondenza della quota più elevata del coronamento della frana;
- un poligono, quando la frana è cartografabile alla scala di rilevamento adottata;
- una linea quando i fenomeni franosi sono di forma molto allungata e presentano una larghezza non cartografabile.

L'inventario IFFI ha censito ad oggi 469.298 fenomeni franosi che interessano un'area di circa 20.500  $km^2$ , pari al 6,8% del territorio nazionale (tab. 5.1). I comuni italiani interessati da frane sono 5.708, pari al 70,5% del totale.

REGIONI E PROVINCE AUTONOME	NUMERO DEI FENOMENI FRANOSI	DENSITÀ DEI FENOMENI FRANOSI	AREE INTERESSATE DA FENOMENI FRANOSI
	numero	num./100 $km^2$	$km^2$
PIEMONTE	35.023	126	2.540
VALLE D'AOSTA	4.359	134	520
LOMBARDIA	130.538	547	3.308
BOLZANO	1995	27	463
TRENTO	9.385	151	879
VENETO	9.476	52	223
FRIULI	5.253	67	511
LIGURIA	7.515	139	425
EMILIA ROMAGNA	70.037	317	2.511
TOSCANA	29.208	127	1.035
UMBRIA	34.545	408	651
MARCHE	42.522	442	1.882
LAZIO	10.548	61	398
ABRUZZO	8.493	78	1.241
MOLISE	22.527	508	494
CAMPANIA	23.430	171	973
PUGLIA	843	4	85
BASILICATA	9.004	90	298
CALABRIA	9.417	62	822
SICILIA	3.657	14	500
SARDEGNA	1.523	6	188
<b>TOTALE</b>	<b>469.298</b>	<b>155</b>	<b>19.9467</b>

**Tabella 5.1:** Censimento fenomeni franosi per singola regione

Le tipologie di movimento più frequenti nell'inventario sono gli scivolamenti rotazionali/traslativi con circa il 32,5%, i colamenti lenti con il 15,3%, i colamenti rapidi con il 14,6% e i movimenti di tipo complesso con l'11,3%.

L'inventario IFFI è stato già impiegato da diverse Autorità di Bacino di rilievo nazionale, interregionale e regionale quale strumento conoscitivo di base per l'aggiornamento dei

Piani di Assetto Idrogeologico (PAI). La cartografia online del Progetto IFFI si è dimostrata inoltre di grande utilità nella gestione delle emergenze idrogeologiche.



(a) Comune di Santo Stefano Quisquina (Agrigento)



(b) Comune di Casteltermeni (Agrigento)

**Figura 5.1:** Esempi di frane complesse sovrainposte su ortofoto del 2000 e su DEM a passo 20 metri

Nel 2005 l'APAT ha pubblicato la banca dati del Progetto IFFI su Internet ([www.sinanet.apat.it/progettoiffi](http://www.sinanet.apat.it/progettoiffi)), mediante l'applicazione WebGIS Cart@net - IFFI.

Inoltre con il Servizio WMS (Web Map Service) del Progetto IFFI, l'utente può sovrapporre il tematismo delle frane dell'Inventario IFFI su altri livelli informativi disponibili su Internet o contenuti in locale nel proprio computer (fig. 5.1).

Ad oggi il progetto IFFI costituisce il primo inventario omogeneo e aggiornato dei fenomeni franosi sull'intero territorio nazionale.



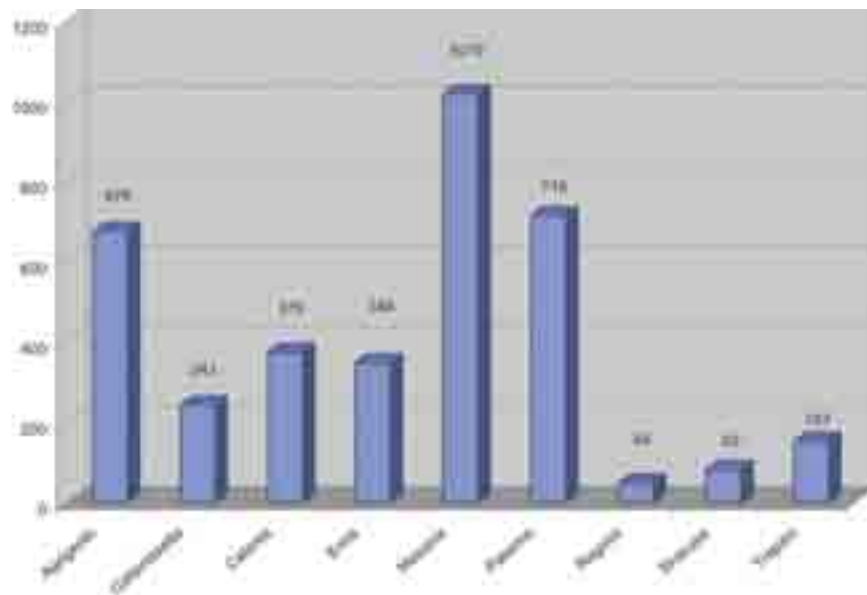
### 5.2.1 Il progetto IFFI Sicilia

In Sicilia il Progetto IFFI è stato realizzato nel corso degli anni 2002-2003 dal Dipartimento di Geologia e Geodesia dell'Università degli Studi di Palermo, per conto dell'Amministrazione Regionale Assessorato Territorio e Ambiente.

Il progetto si è articolato secondo le seguenti fasi:

1. censimento e raccolta dei dati esistenti;
2. (i) controllo tramite fotointerpretazione del volo ATA SICILIA 1997 (1:20.000); (ii) rappresentazione cartografica dei fenomeni su base cartografica in scala 1:25000; (iii) compilazione della "Scheda Frane IFFI"; (iv) verifica della completezza e dell'omogeneità dei dati ed eventuale integrazione sia tramite fotointerpretazione che tramite controllo sul campo;
3. informatizzazione dei dati cartografici, alfanumerici e iconografici.

In totale sono state censite e inventariate 3.098 frane corrispondenti a circa 291 km<sup>2</sup>, suddivise nelle nove province siciliane come riportato nella figura 5.2:



**Figura 5.2:** Inventario delle frane suddivise per territorio provinciale

Per quanto riguarda le tipologie di movimento riconosciute (tab. 5.3) e (fig. 5.3), le più diffuse risultano quelle di tipo complesso e di tipo colamento lento con percentuali simili.

Tipologia di Movimento	n. Frane	n. Frane %
Crollo/Ribaltamento	270	8.7%
Scivolamento rotazionale/traslattivo	651	21%
Espansioni	6	0.2%
Colamento lento	1127	36.3%
Colamento rapido	44	1.4%
Complesso	994	32.2%
Aree soggette a sprofondamenti diffusi	6	0.2%

**Tabella 5.3:** Numero di frane per tipologia di movimento

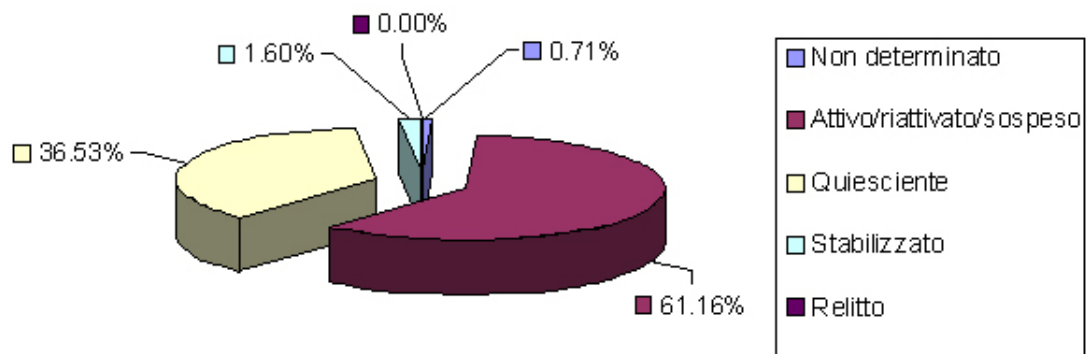


**Figura 5.3:** Percentuale delle frane per tipologia di movimento (IFFI 2003)

La quasi totalità delle frane riconosciute si trova in condizioni di quiescenza o stato attivo/riattivato/sospeso (tab. 5.4 e fig.5.4). Tutti i dati fin qui riportati si riferiscono ad informazioni reperite fino al dicembre 2003.

Stato di Attività	n. Frane	n. Frane %
Non determinato	19	0.71%
Attivo/riattivato/sospeso	1895	61.16%
Quiescente	1132	36.53%
Stabilizzato	52	1.6%
Relitto	0	0.0%

**Tabella 5.4:** Numero di frane per stato di attività



**Figura 5.4:** Percentuale delle frane per stato di attività (IFFI 2003)

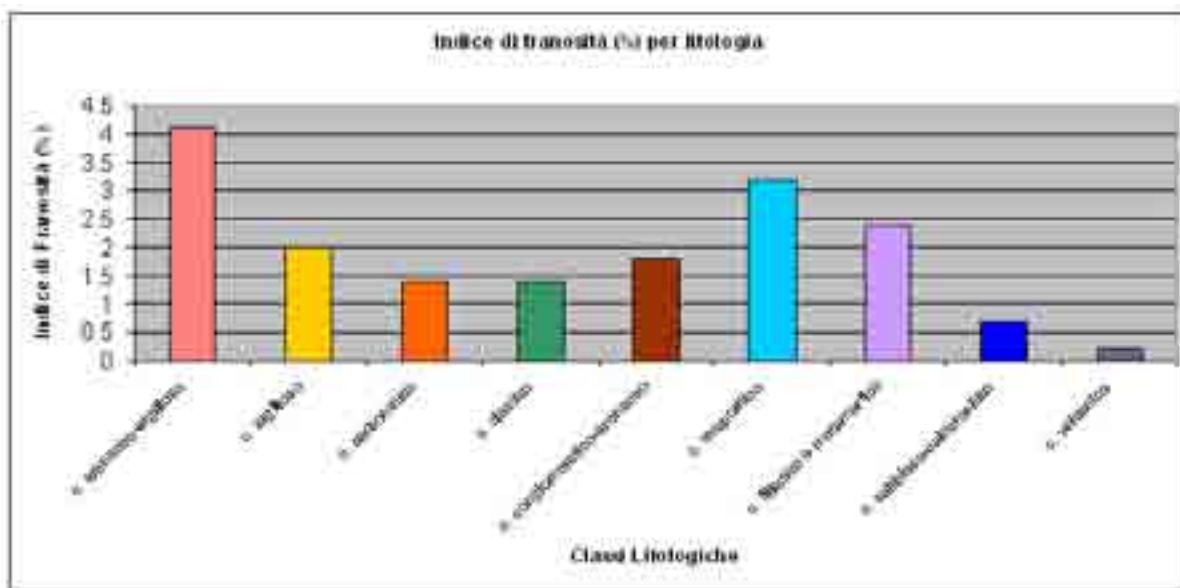
La frequenza dei casi censiti rispetto ad alcuni fattori fondamentali della franosità (topografia, litologia ed uso del suolo) è visibile nelle tabelle 5.5, 3.1, 5.7 e nelle figure 5.5 e 5.6.

Area Totale ( $km^2$ )	Area Montano-Collinare ( $km^2$ )	Area totale in frana ( $km^2$ )	Indice Franosità rispetto all'area totale (%)	Indice Franosità rispetto all'area montano-collinare (%)
25428	22350	291	1.1	1.3

**Tabella 5.5:** Indice di franosità

Litologia	n. Frane	Area classe litologia ( $km^2$ )	Area totale in frana ( $km^2$ )	Indice di Franosità rispetto alla classe litologica (%)
c. arenaceo-argilloso	359	2217	92	4.1
c. argilloso	1246	8705	176	2.0
c. carbonatico	330	3469	50	1.4
c. clastico	74	3246	47	1.4
c. conglomeratico-arenaceo	208	691	13	1.8
c. evaporitico	328	1220	40	3.2
c. filladico e metamorfico	252	882	22	2.4
c. sabbioso-calcarenitico	242	3352	15	0.7
c. vulcanico	59	1646	4	0.2

**Tabella 5.6:** Indice di franosità per litologia



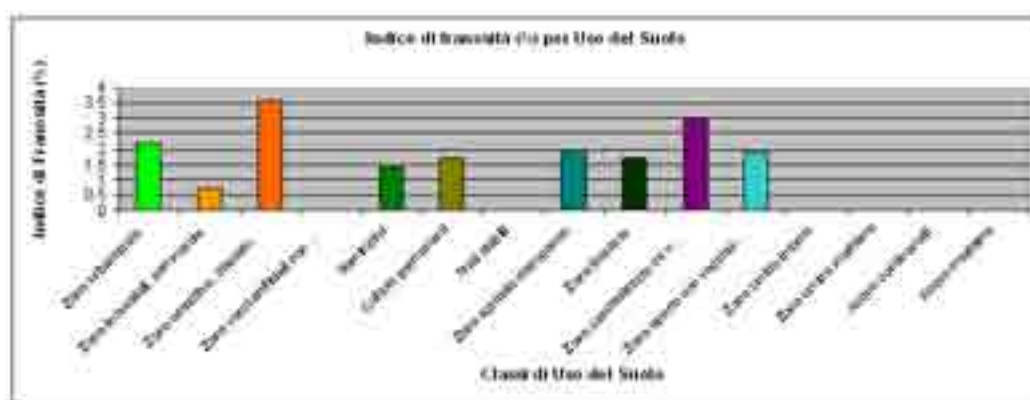
**Figura 5.5:** Indice di franosità (%) per litologia

In particolare, è evidente una forte predominanza della franosità nelle litologie flyschoidi sia pelitiche che arenacee (complessi litotecnici argilloso e arenaceo-argilloso). Si tratta in questo caso di fenomeni di tipo complesso (prevalentemente scorrimenti evolvanti a colata) e di tipo colamento lento. I termini lapidei, quali calcari di piattaforma, gessi, complessi metamorfici e calcareniti pleistoceniche sono prevalentemente interessati da crolli diffusi.

## CAPITOLO 5. Acquisizione della carta inventario dei fenomeni franosi

Uso del Suolo	n. Frane	Area classe uso del suolo (km <sup>2</sup> )	Area totale in frana (km <sup>2</sup> )	Indice di Franosità rispetto alla classe uso del suolo (%)
Zone urbanizzate	365	862	19	2.2
Zone industriali, commerciali e reti di comunicazione	2	131	1	0.7
Zone estrattive, discariche e cantieri	13	83	3	3.6
Zone verdi artificiali non agricole	3	11	0	0.0
Seminativi	449	6803	96	1.4
Colture permanenti	531	4824	85	1.7
Prati stabili	0	2	0	0.0
Zone agricole eterogenee	879	5997	121	2.0
Zone boscate	152	1287	23	1.7
Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	545	4307	132	3.0
Zone aperte con vegetazione rada o assente	159	1051	20	1.9
Zone umide interne	0	2	0	0.0
Zone umide marittime	0	16	0	0.0
Acque continentali	0	53	0	0.0
Acque marittime	0	1	0	0.0

**Tabella 5.7:** Indice di franosità per uso del suolo



**Figura 5.6:** Indice di franosità (%) per uso del suolo

La realizzazione dell'archivio IFFI in Sicilia rappresenta un importante avanzamento nel livello della conoscenza e della distribuzione ed attività dei fenomeni franosi. Infatti, pur partendo da uno scenario eterogeneo e frammentario dei dati iniziali si giunge oggi alla definizione di un quadro conoscitivo sufficientemente rappresentativo della franosità in Sicilia e, soprattutto, omogeneo dal punto di vista delle procedure di acquisizione ed archiviazione dei dati. Il presente archivio è da considerarsi una base di partenza per un ulteriore censimento sistematico delle frane del territorio siciliano e non solo. In prospettiva, essendo disponibile per tutta Italia, rende possibile applicare il modello a scala nazionale. L'archivio IFFI per di più, stante la sua strutturazione su piattaforme informatiche, consente di procedere nell'immediato ad una sua gestione comprendente quindi sia l'implementazione tramite aggiunta, nel caso di nuovi fenomeni, che l'aggiornamento delle schede dei fenomeni già conosciuti, in relazione al loro stato di attività.

### 5.3 Analisi dei dati acquisiti

Quando un'area oggetto di uno studio di valutazione della suscettibilità da frana è alquanto estesa, come nel nostro caso, l'analisi a tappeto di tutta la superficie risulta essere fortemente limitata, se non addirittura impossibile, per ragioni tecniche, temporali e soprattutto economiche.

È comunque fondamentale una fase di controllo e di verifica dei dati acquisiti per attestarne la bontà e la correttezza prima di un loro utilizzo all'interno di futuri modelli.

Determinante, in questo caso è la scelta preliminare di aree di osservazione, opportunamente individuate all'interno dell'area in oggetto, di dimensioni ridotte e che permettano di effettuare uno screening iniziale su un'ampia porzione di territorio. Come zona test è stata scelta un'area di circa  $5708 \text{ km}^2$  situata nella porzione centro-meridionale dell'isola e che il Dipartimento di Protezione Civile, nella suddivisione della Sicilia in sei zone di allerta, ha denominato “Bacino Gela-Platani-Salvo” (fig. 5.7).



**Figura 5.7:** Zone di allerta della Protezione Civile (in rosso il Bacino “Gela-Platani-Salvo”)

Una prima verifica è consistita nel quantificare la bontà dei due archivi a nostra disposizione, la carta inventario del PAI e la carta inventario del progetto IFFI.

Un metodo veloce per testare la corretta sovrapposizione geografica tra le due carte inventario è il metodo proposto da CARRARA [25, 26], dove “ $E$ ” rappresenta *l’indice di errore totale di sovrapposizione*, calcolato come segue:

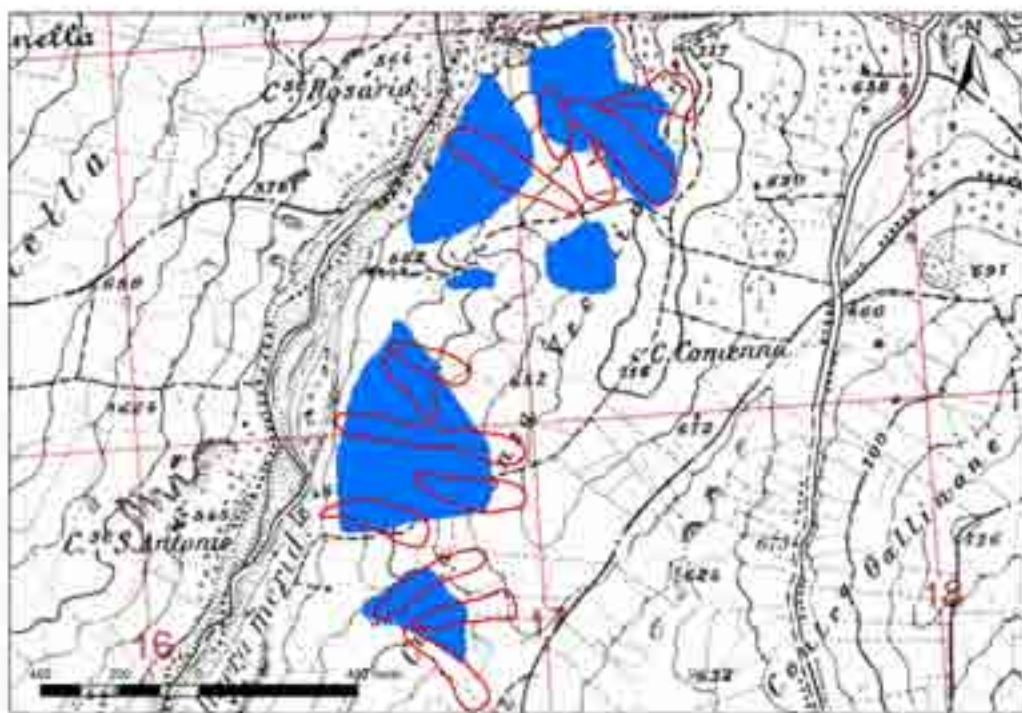
$$E = \frac{(A \cup B) - (A \cap B)}{(A \cup B)}$$

$$0 \leq E \leq 1$$

“ $A$ ” rappresenta l’area totale della carta inventario del PAI, cioè  $30.394.622 \text{ m}^2$  e “ $B$ ” l’area totale della carta inventario del progetto IFFI, cioè  $61.794.506 \text{ m}^2$ . Con  $E = 0$  le due carte presentano le stesse frane nella stessa identica posizione (evento praticamente impossibile), con  $E = 1$ , invece le due carte sono completamente discordanti. Nel nostro caso l’unione delle due carte inventario presenta un’area totale di  $108.388.200 \text{ m}^2$ , mentre l’intersezione (quindi la percentuale di area in frana comune alle due carte) è di  $16.371.817 \text{ m}^2$ . Ne deriva che il valore di  $E$  è  $0,8$  e quindi la sovrapposizione tra i due inventari è di circa il  $20\%$ . Tale risultato era immaginabile dato che l’area in frana dell’archivio PAI è esattamente la metà dell’area in frana mappata nell’archivio IFFI, quindi sarebbe stato comunque impossibile avere un valore di  $E$  prossimo allo zero al massimo, se la sovrapposizione tra i due archivi fosse stata totale, avremmo raggiunto un valore di  $E$  pari a  $0.5$ .

Inoltre i dissesti inventariati dagli operatori del PAI sono quelli che derivano da precise segnalazioni da parte della popolazione o dagli enti locali, e comunque quasi esclusivamente quando questi dissesti interessano strutture urbane di normale uso nel territorio. Pertanto l’archivio delle frane ottenuto non ha nessuna funzione programmatica e/o previsionale, ma si limita solamente a censire le frane avvenute nel passato. Il risultato (fig. 5.8) mostra una generale non differenziazione dei singoli corpi franosi per le quali aree solitamente, quando non è facilmente possibile individuare le diverse parti del corpo franoso in movimento (area di distacco, corpo principale, area di accumulo) viene riportata la dicitura di “area a franosità diffusa”.





**Figura 5.8:** Dettaglio tra l'archivio PAI (blu) e l'archivio IFFI (rosso)

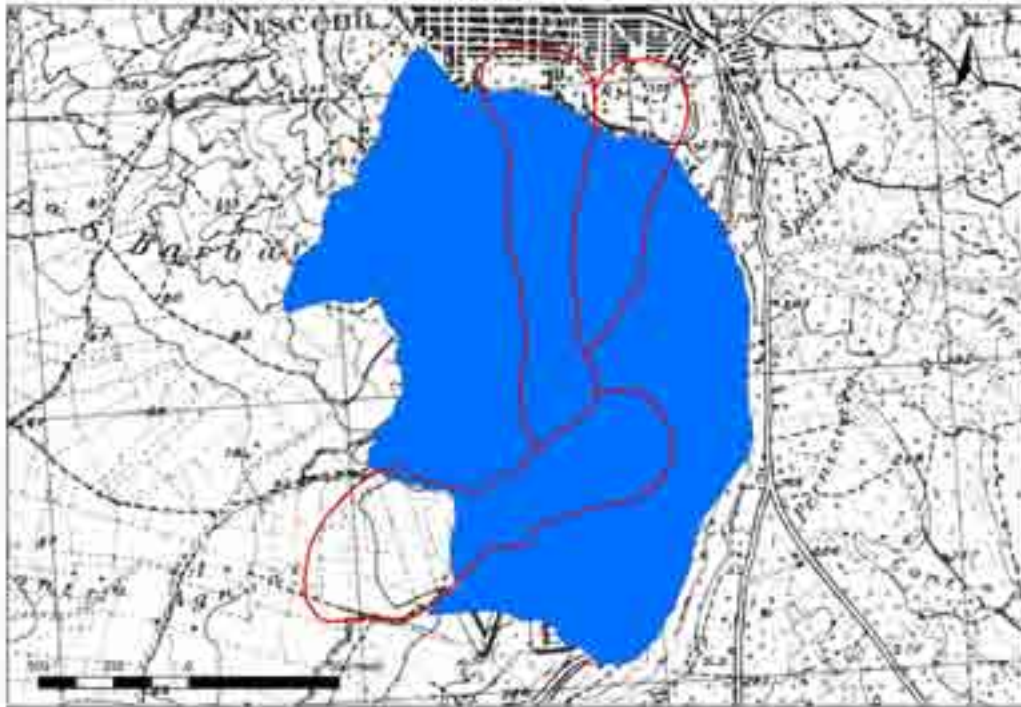
Di contro l'archivio IFFI perimetra ogni singolo corpo franoso distinguendone sia il tipo di movimento che lo stato di attività.

Si è voluto comunque operare un controllo visivo tra le due carte inventario utilizzando le ortofoto ATA del 2007/2008 con pixel a 25 cm caricabili sul software ArcMap tramite i servizi WMS offerti dal sito del SITR (Sistema Informativo Territoriale Regionale - [http://88.53.214.52/sitr/services/Ortofoto\\_ATA20072008/MapServer/WMSServer](http://88.53.214.52/sitr/services/Ortofoto_ATA20072008/MapServer/WMSServer)).

Appare evidente la maggiore precisione e coerenza concettuale delle frane mappate nell'inventario IFFI rispetto a quelle perimetrare nel PAI. Spesso le aree mappate nel PAI sono sommariamente tracciate non tenendo in considerazione eventuali contropendenze, valli incise dai corsi d'acqua e della stessa forma che, nelle condizioni teoriche è determinata dalla tipologia del movimento. Nella figura 5.9 è mostrato in maniera evidente un esempio di differente modalità di perimetrazione dello stesso corpo franoso individuato.

Si evince chiaramente che, mentre per il PAI tutto il corpo in blu è un unico corpo in frana, per l'inventario IFFI (contorno in rosso) l'area è stata suddivisa in tre differenti corpi

franosì. Questo ha delle conseguenze anche in termini del calcolo della densità di frana e quindi nella costruzione dei futuri modelli di suscettibilità da frana.



**Figura 5.9:** Differenza tra perimetrazione PAI (blu) e perimetrazione IFFI (rosso)

Da ciò si evince che l'archivio IFFI, anche se non aggiornatissimo rappresenta ad oggi l'unico inventario di frane corposo, con un buon grado di completezza e affidabilità ma soprattutto disponibile per tutto il territorio nazionale e quindi utilizzabile come dato fondamentale per una modellistica di tipo statistico.

## **5.4 Definizione delle aree instabili e costruzione della banca dati**

Dato che il presente studio è volto all'analisi dei meccanismi di innesco delle frane a cinematisimo lento, una volta scelto l'archivio IFFI come banca dati di base si è proceduto a modificare la classificazione originale in funzione dell'obbiettivo perseguito nel presente lavoro incentrato esclusivamente sulla suscettibilità.

Sulla base di tale considerazione, sono stati estrapolati dall'archivio in oggetto solo i movimenti a cinematica lenta (colamenti lenti, complessi e scivolamenti rotazionali/traslativi) escludendo i fenomeni rapidi (colamenti rapidi e crolli), per la diversità del trattamento nella valutazione della suscettibilità e per la loro scarsa presenza nel territorio.

Le frane complesse, costituite da un primo movimento di tipo traslativo o rototraslativo che evolve in colata di terra o detrito, ricoprono circa lo 0.6% dell'area totale; i colamenti lenti sono presenti per circa lo 0.2% così come gli scivolamenti rotazionali/traslativi.

Le suddette tre tipologie di frane presentano un innesco ed un'evoluzione piuttosto tipici. I primi movimenti avvengono nell'area di nicchia, solitamente ubicata nelle porzioni medio-alte dei versanti, in aree ad elevata pendenza relativa e/o in aree in cui tendono a raccogliersi le acque superficiali. Nei casi in cui si tratta di riattivazioni, è possibile osservare come il primo movimento avvenga di solito come arretramento od allargamento di una nicchia di frana preesistente; in seguito il corpo tenderà ad evolvere estendendosi verso il basso. Da ciò si evince come le condizioni relative alle zone di nicchia e a monte di questa, sono le più rappresentative tra le condizioni di primo innesco.

Nella figura 5.10, è mostrato in maniera inequivocabile come la sede dei franamenti superficiali non è nel corpo della colata (soprattutto nella parte più a valle), ma piuttosto a monte della nicchia o fra i fianchi della colata.

Sono tuttavia frequenti propagazioni del dissesto a monte della nicchia non solo fra eventi diversi, ma anche all'interno dello stesso evento, a causa dei fenomeni di richiamo.

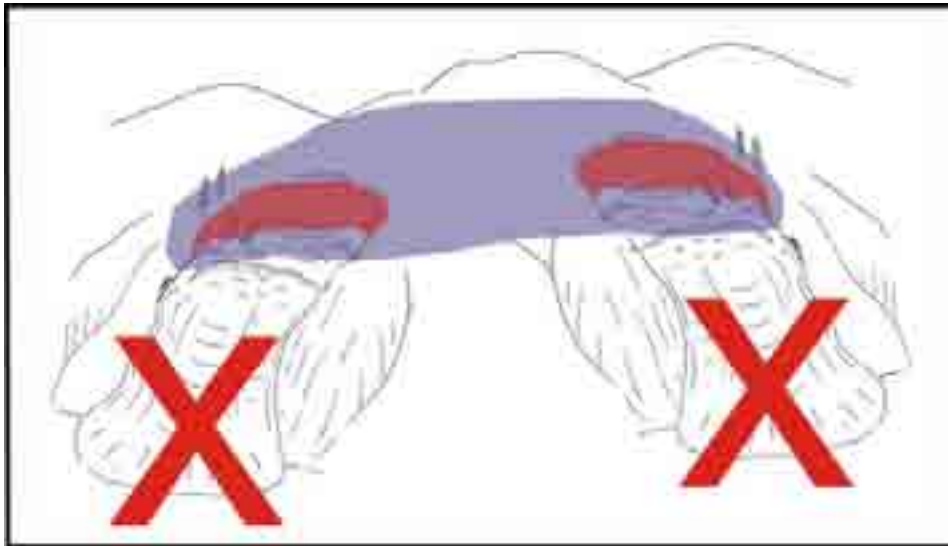


Figura 5.10: Esempio di area considerata instabile

Da quanto sopra esposto risulta essere fondamentale il riconoscimento delle diverse parti di una frana (fig. 5.11), soprattutto il riconoscimento chiaro e netto dell'area di scarpata e dell'area di accumulo (fig. 5.12).

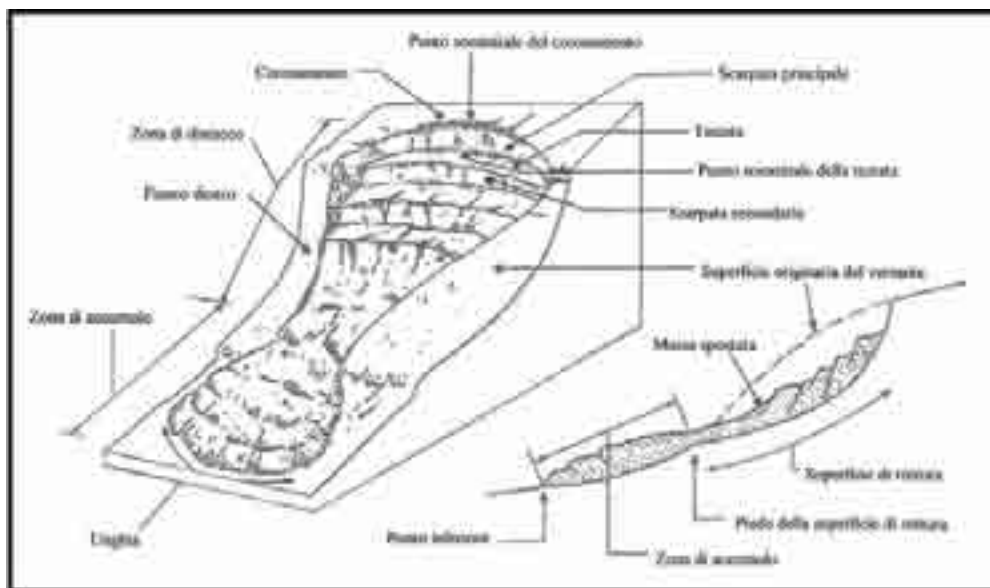
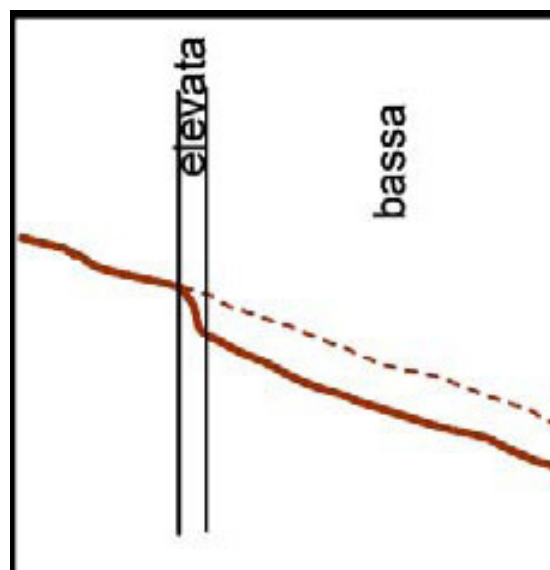


Figura 5.11: Nomenclatura delle varie parti di un movimento franoso[27]



**Figura 5.12:** Frana di tipo complesso in C/da Pioppo (AG)

Se si disegna la distribuzione delle pendenze per i corpi di frana, la curva presenta due picchi, uno relativo alle zone di accumulo (pendenza bassa) e uno relativo alle aree di distacco (pendenza elevata) (fig. 5.13).



**Figura 5.13:** Distribuzione delle pendenze nel corpo di frana

La banca dati creata seguendo questi criteri non può essere considerata una mappa vera e propria dei dissesti rilevati, ma piuttosto una mappa di suscettibilità empirica interpretata soggettivamente da un esperto.

In questo lavoro tutti i poligoni di frana originari presi dall'archivio IFFI sono stati modificati applicando i seguenti criteri:

1. le aree all'interno del poligono di frana con pendenze maggiori del 5° sono da considerare le più rappresentative delle condizioni di innesco di frana;
2. di contro sono state escluse le zone con pendenze minori del 5° dato che in questo caso ci troviamo già nella zona di accumulo della frana.

Operativamente la modifica dei poligoni relativi al corpo di frana principale è avvenuta seguendo una procedura automatizzata all'80% tramite un eseguibile dedicato, denominato "*StatisticaPuntiInPoligoni.exe*" (fig. 5.14).

Tramite tale eseguibile sono state estratte le quote del terreno, utilizzando il DEM a passo 20 metri estrapolato dai tipi dell'Istituto Geografico Militare, e per ogni singolo poligono di frana sono state elaborate analisi statistiche sui punti quotati, che hanno permesso il calcolo della quota massima, della quota minima e della quota media.

Incrociando i file relativi alla pendenza e quelli creati dall'eseguibile summenzionato, prendendo come riferimento solo le zone con pendenza maggiori del 5° e le zone con quote maggiori della quota media, all'interno di un qualsiasi software GIS in grado di eseguire il comando di Spatial Join è stato possibile, per ogni singolo corpo di frana, ottenere un nuovo poligono relativo alla sola zona di distacco.

```

string calcolaStatisticaPuntiInPoligoni(string campo, string strInputPunti, string strInputPoligoni, string strOutputFile)
{
    double novalue=9999.9999;

    printf("-----\n");
    printf("ELABORAZIONE\n");

    // shape di ingresso e di uscita
    shapefile puntiIN;
    puntiIN.carica(strInputPunti);
    if(puntiIN.errorre->IsOn())
    { return(puntiIN.errorre->get()); }

    shapefile poligoniIN;
    poligoniIN.carica(strInputPoligoni);
    if(poligoniIN.errorre->IsOn())
    { return(poligoniIN.errorre->get()); }

    // cerca il campo
    int icampo=-1;
    for(int i=0; i< puntiIN.campiDBF->numCampi; i++)
    {
        string nc=puntiIN.campiDBF->campi[i].nome;
        if(nc==campo)
        { icampo=i; break; }
    }
    if(icampo==-1) return("Campo non presente");

    // array dei minimi e dei massimi
    vector<double> minarray(poligoniIN.numElem);
    vector<double> maxarray(poligoniIN.numElem);
    vector<double> medarray(poligoniIN.numElem);
    vector<double> medkbsarray(poligoniIN.numElem);

    vector<double> medianarray(poligoniIN.numElem);
    vector<double> Q1array(poligoniIN.numElem);
    vector<double> Q3array(poligoniIN.numElem);
    vector<double> IQRarray(poligoniIN.numElem);

    vector<double> scartoarray(poligoniIN.numElem);
    vector<double> scartomediana&kbsarray(poligoniIN.numElem);
    vector<double> karray(poligoniIN.numElem);
    vector<double> kmedianarray(poligoniIN.numElem);

    vector<int> countarray(poligoniIN.numElem);

    vector<point2d> pointArray(puntiIN.numElem);
    vector<double> valarray(puntiIN.numElem);

```

Figura 5.14: Estratto del codice dell'eseguibile "StatisticaPuntiInPoligoni.exe"





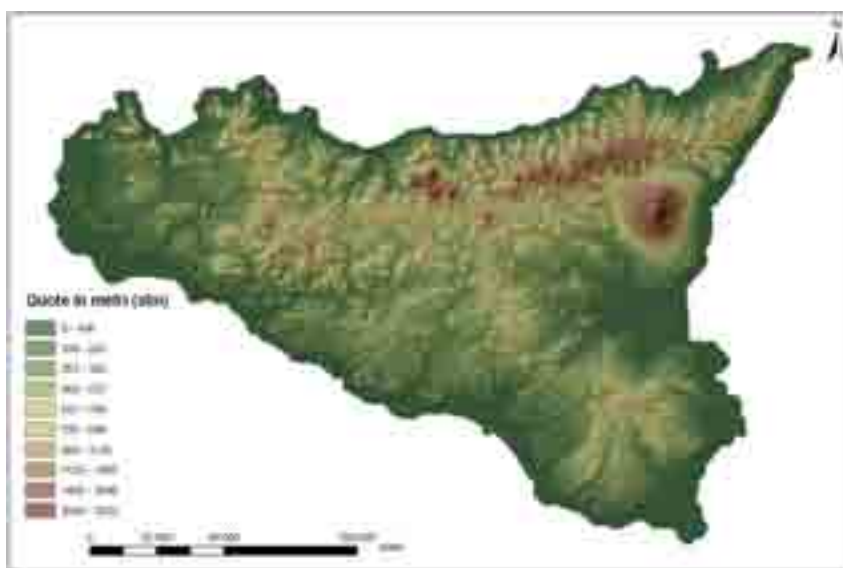
## Capitolo 6

# Acquisizione della Cartografia Tematica

La stima della pericolosità è funzione delle caratteristiche fisiche e di franosità del territorio indagato e del dettaglio che si intende raggiungere a livello di zonazione; di conseguenza, i procedimenti adottati per tale stima sono particolarmente diversificati nell'ambito della letteratura. La valutazione della pericolosità a scala regionale presenta delle evidenti limitazioni, legate alla difficoltà di acquisire l'insieme dei dati necessari relativi ai vari fattori predisponenti alla suscettibilità. La scelta dei fattori predisponenti è avvenuta tenendo conto di quei fattori di franosità giudicati di maggiore influenza dalla odierna letteratura [28, 29], delle caratteristiche fisiografiche del territorio, della tipologia dei fenomeni franosi maggiormente ricorrenti (fenomeni a cinematica lenta) e della disponibilità degli enti governativi di cedere dati completi a copertura regionale; di conseguenza sono stati scelti i seguenti temi: (a) pendenza del versante, (b) carta litologica, (c) uso del suolo, (d) modello idrologico *CN* (Curve Number), (e) carta dell'indice di Anomalia Pluviometrica. Il primo parametro, di tipo morfometrico, è stato ricavato tramite software GIS dal DTM a passo 20 metri, estrapolato dai tipi dell'Istituto Geografico Militare a copertura nazionale; la carta litologica è stata ricavata dalla digitalizzazione della carta geologica a scala 1:100000; la carta di uso del suolo a scala 1:100000 è stata realizzata all'interno del progetto Corine Land Cover [30] e aggiornata nel 2000; la carta dei valori di Curve Number è stata ottenuta tramite uno specifico codice di calcolo realizzato all'interno del software ArcGIS, utilizzando gli strati informativi sopra citati riguardanti la litologia e l'uso del suolo, oltre alla pedologia e infine la carta dell'indice di Anomalia Pluviometrica è stata ottenuta dai dati di pioggia relativi al periodo compreso tra il 1924 e il 1995 tramite la Regione Sicilia.

## 6.1 Il Modello Digitale del Terreno (D.T.M.)

Il Modello Digitale del Terreno (DTM) (fig. 6.1) utilizzato per l'intero progetto è stato prodotto all'interno del Laboratorio GIS istituito nell'ambito del progetto POMA (Progetto Operativo Multiregione Ambiente) nato alla fine degli anni '90 da una collaborazione tra Ministero dell'Ambiente, Istituto Geografico Militare, Regione Veneto e Regione Basilicata. Tale DTM è stato generato dall'elaborazione dei tipi dell'Istituto Geografico Militare, in particolare dai file delle curve di livello e dai file di punti quotati provenienti per la maggior parte dalla cartografia a scala 1:25000 (Serie 25V) e per una minima parte dalla cartografia a scala 1:25000 (Serie 25). Dove mancante è stato necessario utilizzare anche dati provenienti da cartografia a scala 1:50000 e 1:100000. I suddetti dati sono stati mosaicati e ritagliati secondo un grigliato espresso in coordinate piane WGS84 di 10x10 km .



**Figura 6.1:** Modello Digitale del Terreno (DTM)

Da ogni file IGM in formato DXF vector sono stati estratti, mediante software dedicato tutti i punti quotati (isolati e appartenenti ad isoipse) per costituire dei file ASCII testo contenenti per ogni singolo punto le coordinate X, Y e Z. Tramite software commerciale questi listati di punti sono stati interpolati utilizzando l'interpolatore geostatistico di Kriging, forzando la quota zero nelle aree coperte dal mare o da laghi; inoltre è stato inserito il valore "no-data" nelle aree oltre confine ottenendo al termine elementi DTM, in formato GRD, con struttura a celle quadrate omogenee con passo di 20 metri.

Per renderli facilmente interscambiabili, i DTM creati sono stati convertiti in formato ASCII testo, leggibile dalla maggioranza dei software GIS attualmente in commercio.

L'accuratezza altimetrica del DTM finale a copertura nazionale è molto variabile ed è funzione della provenienza dei file di origine: mediamente la quota del pixel è pari alla quota media più o meno 10-15 cm. I problemi maggiori sono stati riscontrati nelle aree dove l'informazione altimetrica risulta particolarmente carente, per esempio per mancanza di curve di livello o punti quotati (zone urbanizzate, valli, picchi montuosi, zone rocciose, scarpate, calanchi, etc.); in questi casi l'accuratezza altimetrica risulta essere inferiore a quella media riscontrata.

## 6.2 La Pendenza

La pendenza rappresenta un fattore predisponente di notevole importanza per la stabilità dei versanti, come ben evidenziato in numerose pagine di letteratura specifica [2, 31]; infatti, questo è direttamente legato alla inclinazione dei possibili piani o orizzonti di rottura e, dunque, risulta positivamente correlato con la distribuzione delle frane.

La pendenza è uno degli attributi più comunemente calcolati a partire da modelli digitali del terreno (DTM) e rappresenta il gradiente del piano tangente alla superficie nel punto desiderato nella direzione di massima pendenza; matematicamente parlando, equivale alla derivata prima della funzione che esprime la variazione di quota lungo la stessa direzione. Questa derivata è generalmente ottenuta, per ogni cella o pixel, in base al valore delle celle all'interno di una finestra di nove elementi che viene fatta scorrere sul modello digitale [32, 33].

Il metodo di calcolo utilizzato si trova all'interno del software GIS della ESRI meglio conosciuto come "ArcGIS - ArcINFO", che utilizza la seguente equazione:

$$\tan \theta = \left[ \left( \frac{\delta z}{\delta x} \right)^2 + \left( \frac{\delta z}{\delta y} \right)^2 \right]^{0.5}$$

dove:

$$\left[ \frac{\delta z}{\delta x} \right] = [(z_{i+1,j+1} + 2z_{i+1,j} + z_{i+1,j-1}) - (z_{i-1,j+1} + 2z_{i-1,j} + z_{i-1,j-1})] / 8\delta x$$

è il gradiente nella direzione Est - Ovest, mentre:

$$\left[ \frac{\delta z}{\delta y} \right] = [(z_{i+1,j+1} + 2z_{i,j+1} + z_{i-1,j+1}) - (z_{i+1,j-1} + 2z_{i,j-1} + z_{i-1,j-1})] / 8\delta x$$

è il gradiente nella direzione Nord - Sud.

Nelle suddette espressioni  $z_i$  è la quota del punto  $i$  - esimo mentre  $\delta x$  rappresenta la larghezza della cella del DTM.

Nella maggior parte dei software GIS la pendenza (fig. 6.2,6.3) è ottenuta partendo dal DTM tramite il comando SLOPE presente all'interno dell'estensione denominata Spatial Analyst, modulo fondamentale per i calcoli su dati di tipo raster.



Figura 6.2: Carta delle Pendenze

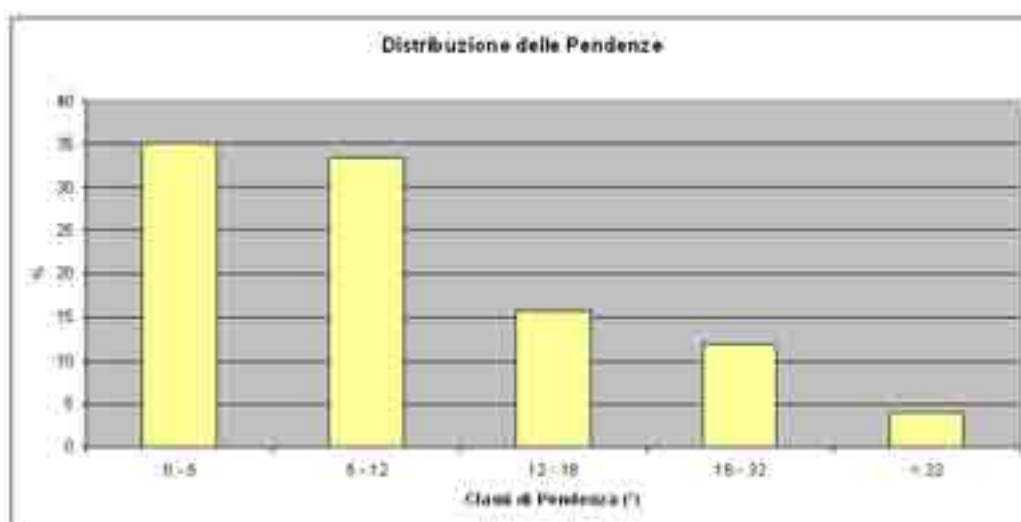


Figura 6.3: Distribuzione delle Pendenze in Sicilia

La classificazione in cinque classi di pendenza è stata fatta su base statistica, considerando le caratteristiche della distribuzione di frequenza della pendenza media del terreno all'interno delle frane e su dati di letteratura riguardanti soprattutto scivolamenti rotazionali profondi e scivolamenti con evoluzione in colate di terra avvenuti nell'Appennino settentrionale [34, 35].

L'analisi statistica rivela l'esistenza di soglie fisiche che influenzano la pericolosità e che permettono la parametrizzazione dei fattori. I criteri utilizzati sono stati i seguenti:

- distinzione dei picchi di frequenza presumibilmente appartenenti a differenti popolazioni;
- individuazione dei punti di flesso della distribuzione, poiché rappresentano modificazioni di tendenza delle distribuzioni.

Le curve di distribuzione di frequenza ottenute mostrano un picco principale ed altre convessità che sono probabilmente ricollegabili alla presenza di distribuzioni secondarie. Si è quindi proceduto all'individuazione dei valori di picco secondari e alla definizione di intervalli simmetrici rispetto ad essi.

Come si evince nella figura 6.4 la suddivisione del parametro pendenza è avvenuta sulla base del punto di flesso presente a ( $5^\circ$ ), del picco di frequenza principale ( $12^\circ$ ), di picchi o flessi secondari meno marcati ( $18^\circ$ ,  $32^\circ$ ).

Alla fine gli intervalli di pendenza considerati sono stati i seguenti:

- $0 - 5^\circ$
- $5 - 12^\circ$
- $12 - 18^\circ$
- $18 - 32^\circ$
- $> 32^\circ$

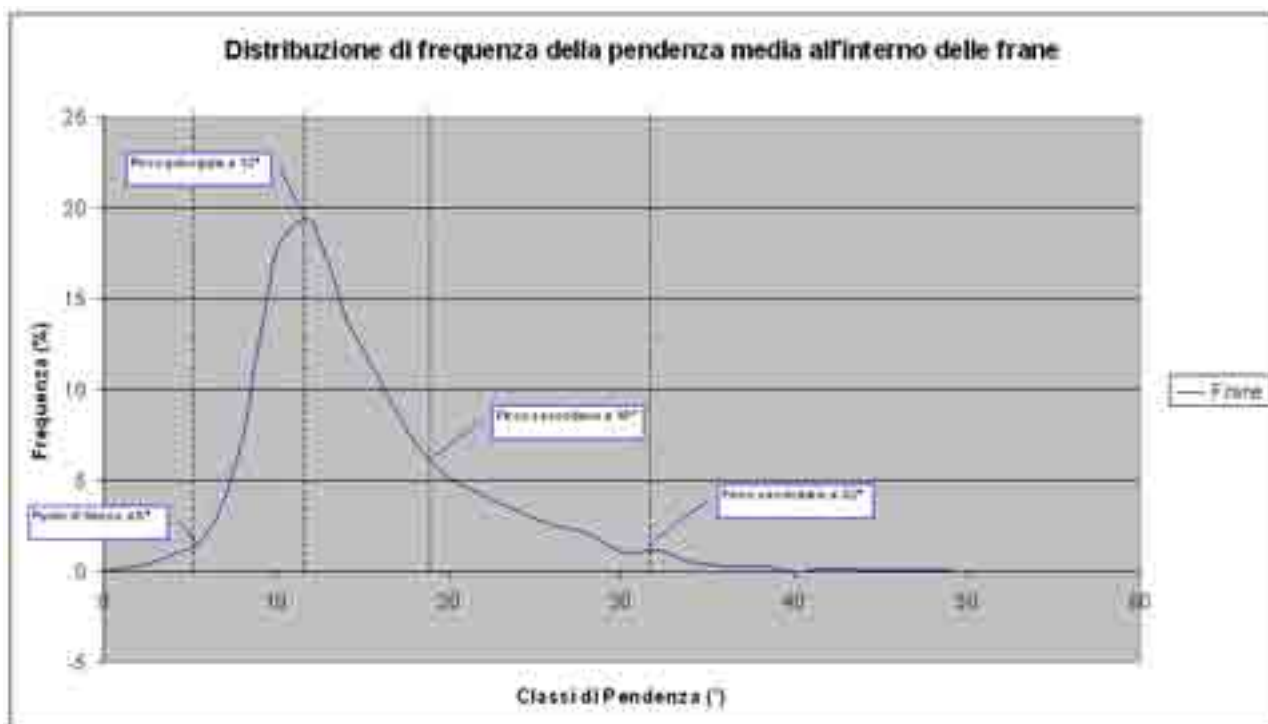


Figura 6.4: Distribuzione di frequenza delle pendenza media all'interno delle frane

### 6.3 L'Uso del Suolo e il progetto Corine Land Cover

Diversi tipi di utilizzo del suolo comportano un diverso grado di impedimento, o impedenza, nei confronti dell'erosione e degradazione dei suoli e sui fenomeni di instabilità in genere, inoltre possono anche essere considerati un indicatore di franosità *a posteriori*; motivo per cui la carta di copertura del territorio costituisce un elaborato fondamentale ai fini della valutazione della suscettibilità da frana

Nella seconda metà degli anni '80, a seguito della emanazione della Decisione n. 85/338/CEE, venne emanato il Programma CORINE (*Coordination of Information on the Environment*) al fine di raccogliere e coordinare le informazioni sullo stato dell'ambiente e delle risorse naturali della Comunità e di garantirne la conoscenza. Uno dei due sottoprogetti di suddetto programma, precisamente il CORINE *Land Cover Project* riguardava il rilievo delle classi di copertura del suolo.

L'obiettivo principale del progetto CORINE *Land Cover* è stato quello di realizzare la carta di copertura del suolo europea denominata CORINE *Land Cover Map*. Questa prevede, secondo la propria terminologia, 44 classi organizzate secondo 3 livelli gerarchici:

- il primo, con cinque classi, indica le maggiori suddivisioni del territorio nel pianeta;
- il secondo, con quindici classi, rappresenta l'uso del suolo a piccola scala (1:500000) (fig. 6.5);
- il terzo, con quarantuno classi, è usato per avere maggiore dettaglio con scala a 1:100000.

L'unità spaziale corrisponde ad una zona in cui la copertura può essere considerata omogenea (erba, acqua, foresta) o ad una zona che, pur essendo una combinazione di zone elementari (omogenee), rappresenta strutture caratteristiche di copertura; essa rappresenta, tenuto conto della scala di lavoro, una superficie significativa distinguendosi nettamente dalle unità che la circondano; inoltre la sua struttura in termini di copertura del territorio risulta sufficientemente stabile nel tempo.

Un'attenzione particolare va posta infine al Progetto *Image* e CORINE *Land Cover 2000*, che prevede l'acquisizione di una copertura di immagini telerilevate mediante satellite Landsat 7 ETM+ (*Image 2000*) per l'aggiornamento della copertura CORINE *Land Cover* all'anno 2000 (CLC 2000) e la produzione di un database geografico dei cambiamenti di uso del suolo tra il 1990 ed il 2000 (CLC change) [36].





**Figura 6.5:** Carta di Uso del Suolo tratta dal Corine Land Cover (Livello 2)

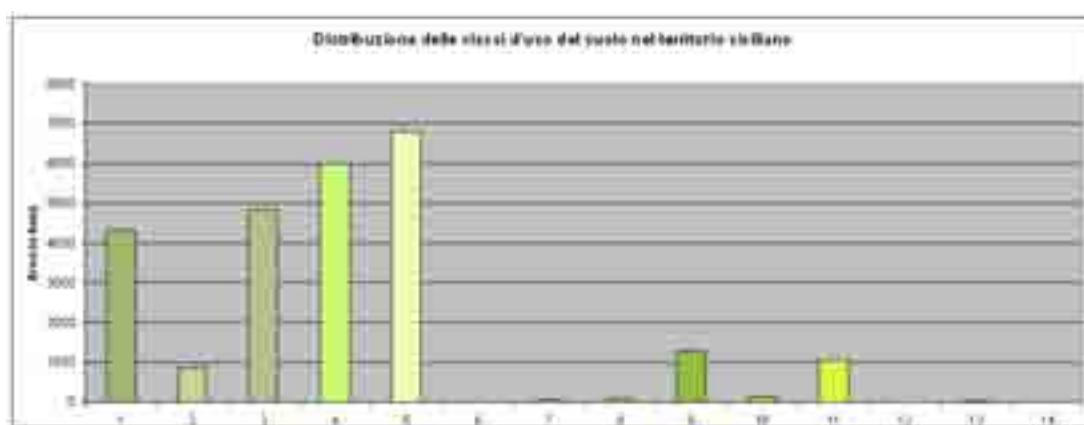
Nel presente progetto, dovendo lavorare su dati a scala regionale, è stato preso in considerazione solo il secondo livello della legenda CORINE (fig. 6.6), passando così dalle 44 classi del terzo livello alle sole 15 classi del secondo livello, in modo da considerare un numero di classi tali da non complicare e appesantire le successive procedure di calcolo.

Le quindici classi utilizzate nella procedura di valutazione della pericolosità sono elencate di seguito:

1. acque continentali
2. acque marittime
3. seminativi
4. prati stabili
5. colture permanenti
6. zone urbanizzate
7. zone industriali commerciali e reti di comunicazione
8. zone estrattive, discariche e cantieri



(23.58%) troviamo le zone agricole eterogenee e con un valore leggermente inferiore pari a 4824 km<sup>2</sup> (18.97%) le colture permanenti; le zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea coprono 4307 km<sup>2</sup> (16.93%), mentre le zone boscate presentano una copertura di 1287 km<sup>2</sup> (5.06%); le zone urbanizzate ricoprono solamente 862 km<sup>2</sup> (3.38%) e le zone aperte con vegetazione rada o assente si attestano su 1051 km<sup>2</sup> (4.13%); le restanti classi tra cui le zone industriali-commerciali e reti di comunicazione, le zone estrattive-discardiche e cantieri, le zone verdi artificiali non agricole, le zone umide marittime, le zone umide interne e le acque continentali e marittime presentano una percentuale pari all'1.15%.



**Figura 6.7:** Distribuzione delle classi d'uso del suolo nel territorio siciliano

1. Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea;
2. Zone urbanizzate;
3. Colture permanenti;
4. Zone agricole eterogenee;
5. Seminativi;
6. Acque marine;
7. Acque continentali;
8. Zone estrattive discariche e cantieri;
9. Zone boscate;
10. Zone industriali, commerciali e reti di comunicazione;
11. Zone aperte con vegetazione rada o assente;
12. Zone verdi artificiali non agricole;
13. Zone umide marittime;
14. Zone umide interne.

## 6.4 La Carta Geologica d'Italia a scala 1:100000

La carta geologica a scala 1:500000 redatta in 5 fogli nel 1970 è ad oggi l'unico dato geologico in formato digitale a scala nazionale. Purtroppo però la scala di tale carta presenta un'eccessiva semplificazione delle classi litotecniche, generando quindi una serie di problematiche nel calcolo del modello probabilistico non facilmente superabili. La soluzione migliore si potrà avere quando sarà disponibile la carta geologica CARG (CARTografia Geologica) a scala 1:50000 ancora in fase di elaborazione. Per questo motivo si è optato di lavorare sulla Carta Geologica d'Italia a scala 1:100000.

La realizzazione di tale carta ebbe inizio, in Italia, nel 1877 e dopo varie vicissitudini fu terminata solo nel 1976 ed è costituita da 277 fogli.

In attesa del completamento della nuova Carta Geologica alla scala 1:50000 (CARG), il centomila geologico si può considerare al momento l'unica carta geologica ufficiale coprente l'intero territorio nazionale.

Nel presente lavoro si sono utilizzati i fogli al 100000 in formato raster (fig. 6.8) e georiferiti nel sistema di coordinate piane WGS84 fuso 33, forniti da ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) nell'ambito del progetto denominato "Repertorio completo della cartografia geologica d'Italia".



**Figura 6.8:** Mosaico rasterizzato dei fogli della Carta Geologica d'Italia a scala 1:100000

Tali raster sono stati mosaicati così da creare un dato continuo. Successivamente il dato raster è stato vettorializzato in maniera semi-automatica e infine è stata creata una carta litotecnica semplificata, accorpando le classi in funzione del comportamento meccanico generale; essa è suddivisa in 9 classi litotecniche, le quali si possono considerare un buon compromesso per evitare tutta quella serie di problematiche che un eccessivo numero di classi comporterebbe nei calcoli statistici della pericolosità.

### 6.4.1 Litologia

La litologia è considerata uno dei fattori predisponenti più importanti, insieme alla pendenza e all'uso del suolo, nella valutazione della suscettibilità, in quanto condiziona i parametri meccanici del materiale e quindi la sua coesione e resistenza al taglio. Ad esempio i terreni argillosi presentano parametri di resistenza al taglio più "scadenti" rispetto ai terreni lapidei di tipo granulare e, quindi, hanno una più elevata suscettibilità all'instabilità dei versanti. La resistenza al taglio degli ammassi rocciosi, invece, dipende dalla resistenza al taglio della roccia intatta, dalle caratteristiche geomeccaniche e dalle condizioni al contorno delle possibili discontinuità.

La costruzione metodologica della carta litologica in diversi complessi litotecnici è avvenuta considerando le caratteristiche petrografiche, sedimentologiche, tessiturali, strutturali delle formazioni litologiche presenti in Sicilia, ma non considerando il loro assetto stratigrafico.

I passaggi principali sono stati i seguenti:

- Eliminazione dei depositi di frana e ricostruzione dei contatti sepolti sulla base dell'assetto strutturale delle formazioni; questo passaggio ha permesso l'individuazione delle litologie con maggiore propensione al dissesto;
- Accorpamento delle formazioni in unità o complessi litotecnici secondo quanto riportato nella tabella 6.1;
- Eliminazione dei poligoni con superficie minore di 5 ha tramite software GIS e successiva inclusione di questi ultimi all'interno dei poligoni attigui, così da semplificare il calcolo statistico finale.

COMPLESSO LITOTECNICO	
1.	Complesso clastico di deposizione continentale
2.	Complesso filadico e metamorfico
3.	Complesso sabbioso-calcarenitico
4.	Complesso evaporitico
5.	Complesso conglomeratico-arenaceo
6.	Complesso argilloso
7.	Complesso arenaceo-argilloso
8.	Complesso carbonatico
9.	Complesso vulcanico

**Tabella 6.1:** Classificazione litotecnica

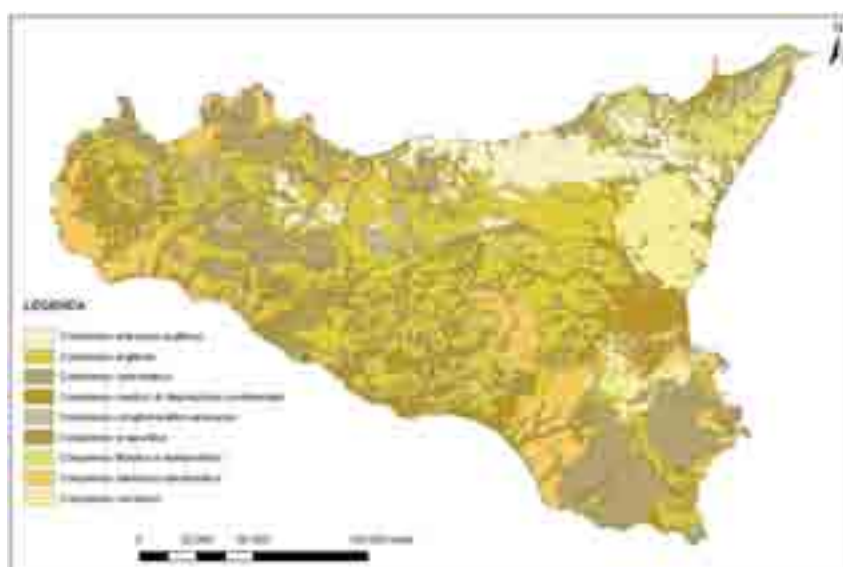
Al fine di perseguire lo scopo della presente tesi si è ritenuto preferibile riunire in unità o complessi litotecnici, i litotipi con analoghe caratteristiche meccaniche, estrapolandoli dalla vettorializzazione della carta geologica a scala 1:100000.

Tali unità sono elencate di seguito:

- *Complesso clastico di deposizione continentale*, comprendente depositi alluvionali talora terrazzati, depositi litorali, lacustri e palustri e detriti di falda;
- *Complesso filadico-metamorfico* della catena metamorfica peloritana;
- *Complesso sabbioso-calcarenitico*, plio-pleistocenico;
- *Complesso evaporitico*, che comprende tutti i litotipi della Formazione Gessoso - Solfifera del Miocene superiore, come il tripoli, il calcare solfifero, i gessi ed i sali;
- *Complesso conglomeratico-arenaceo*, comprendente le litofacies terrigene del Miocene medio - superiore (ad esempio la Formazione Terravecchia);
- *Complesso argilloso*, comprendente tutte le formazioni prevalentemente argillose del territorio, quali le argille pleistoceniche, le argille azzurre medio-plioceniche, le marne a foraminiferi del Pliocene inferiore, le formazioni argillose e marnose del Mioce-

ne mediosuperiore, le litofacies pelitiche dei depositi di Flysch, le argille brecciate e le argille varicolori;

- *Complesso arenaceo-argilloso*, che comprende tutte le formazioni flyschoidi a prevalente composizione arenacea diffuse soprattutto nella Sicilia settentrionale (ad esempio il Flysch Numidico);
- *Complesso carbonatico*, che raggruppa tutte le formazioni calcaree, calcareo - dolomitiche e dolomitiche di età compresa tra il Mesozoico ed il Terziario, che costituiscono l'ossatura della Catena Appenninico-Maghrebide siciliana; si ritrova nei Monti di Palermo, nelle Madonie, nei Sicani, nei Monti di Trapani e costituisce la successione degli Iblei, nella Sicilia sud-orientale;
- *Complesso vulcanico*, comprendente le colate laviche attuali, storiche o antiche dell'Etna e le vulcaniti antiche degli Iblei.



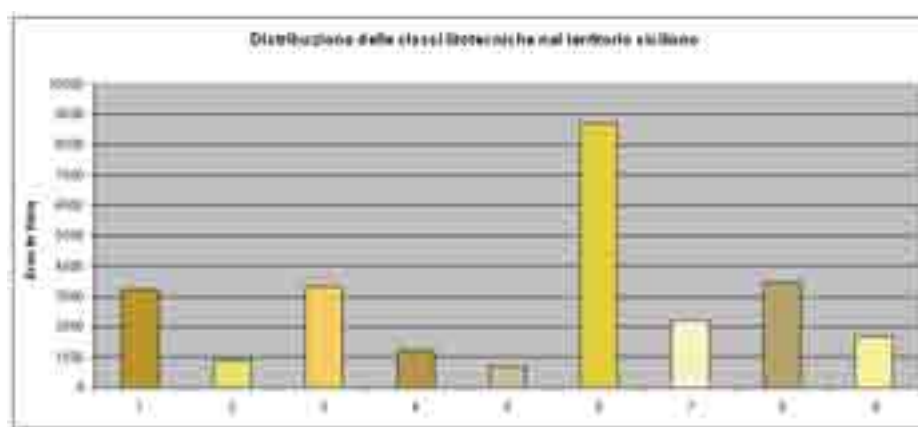
**Figura 6.9:** Carta geologica riclassificata in 9 classi litotecniche

Nelle varie epoche geologiche, le numerose fasi tettoniche hanno modificato gli originali rapporti fra i vari settori geologici prima descritti. L'orogenesi del Miocene - Pliocene inferiore ha dato luogo a strutture di ricoprimento con movimenti traslativi e plicativi che hanno formato, nel settore di Catena, diverse unità stratigrafico-strutturali sovrascorse le

une sulle altre [17]. La morfologia del paesaggio, infine, è il risultato della neotettonica e del sollevamento a questa associato che provoca innalzamenti di oltre 1.000 metri di quota ed un conseguente approfondimento delle valli fluviali.

La distribuzione spaziale dei complessi litotecnici che affiorano nell'area in esame è quella presentata nella figura 6.9.

Nell'istogramma di figura 6.10 viene mostrata anche la distribuzione con cui affiorano i complessi litotecnici.



**Figura 6.10:** Distribuzione delle classi litotecniche nel territorio siciliano

1. Complesso clastico di deposizione continentale; 2. Complesso filladico e metamorfico; 3. Complesso sabbioso-calcarenitico; 4. Complesso evaporitico; 5. Complesso conglomeratico-arenaceo; 6. Complesso argilloso; 7. Complesso arenaceo-argilloso; 8. Complesso carbonatico; 9. Complesso vulcanico.

Dall'istogramma suddetto emerge che l'unità litotecnica predominante nell'area in oggetto, come detto precedentemente, è costituita dal complesso argilloso coprente circa 8700 km<sup>2</sup> (34.2%) dell'intero territorio, seguono il complesso carbonatico, il complesso sabbioso-calcarenitico e il complesso clastico di deposizione continentali rispettivamente con cifre intorno a 3400 km<sup>2</sup> (13%) e il complesso arenaceo-argilloso con 2217 km<sup>2</sup> (8.7%). Le altre unità litotecniche presenti affiorano in scarse percentuali, e in ordine decrescente troviamo: il complesso vulcanico con 1646 km<sup>2</sup> (6.4%), il complesso evaporitico con 1220 km<sup>2</sup> (4.8%), il complesso filladico e metamorfico con 882 km<sup>2</sup> (3.4%) ed infine il complesso conglomeratico-arenaceo con 691 km<sup>2</sup> (2.7%).

Dalla figura 6.10 osserviamo che la classe litotecnica predominante è quella costituita dai terreni a comportamento pseudocoerente. Fanno parte di questa classe tutti i termini nei quali è presente una frazione argillosa estremamente abbondante. Per questa unità l'e-



lemento caratterizzante del comportamento meccanico è costituito dall'estrema variabilità della coesione e della resistenza al taglio, che si osserva in funzione del contenuto in acqua. I terreni argillosi riescono infatti a contenere molta acqua, ma non consentono che la stessa circoli. La presenza di acqua all'interno della struttura dei terreni argillosi determina una diminuzione del loro grado di coesione (evidenziabile attraverso la definizione del loro limite di plasticità e liquidità) e di resistenza al taglio. In pratica si passa da un comportamento complesso semicoerente, in condizioni di bassa saturazione, ad un comportamento quasi da fluido visco-plastico, per contenuti in acqua elevati. Quest'ultima condizione è quella resa evidente dalle deformazioni di tipo colamento, largamente riscontrate nell'area in esame.

## 6.5 Il modello idrologico: il metodo del *Curve Number (CN)*

È noto come la presenza di acqua nei versanti svolge la sua azione nefasta in modi molto diversi. Quest'ultima influenza direttamente la stabilità dei terreni, poiché da una parte aumenta il peso specifico del terreno imbibito di acqua e dall'altra modifica largamente le resistenze disponibili sui terreni pseudo-coerenti, le cui caratteristiche meccaniche risultano fortemente peggiorate. Quando la presenza di acqua è sovrabbondante si può assistere a vere e proprie colate. Uno dei metodi idrologici in grado di determinare la quantità di acqua infiltrata e defluita nel terreno, utilizzato nel presente lavoro, è il metodo del Curve Number (CN - SCS). Trattasi di un modello empirico a base fisica, ideato dal Soil Conservation Center degli Stati Uniti nel 1972 [37] che considera il deflusso superficiale come la differenza fra precipitazione e perdite, dove in queste ultime si inglobano oltre alle perdite per infiltrazione anche quelle per intercettazione da parte delle piante, per accumulo sulle depressioni superficiali e per l'imbibimento iniziale del terreno. I parametri di tale modello non sono stati calibrati solo in base ai dati di infiltrazione, ma anche a quelli relativi a prove di laboratorio e a misure sul campo di un enorme numero di bacini di varie dimensioni negli Stati Uniti, messi in relazione con i tipi pedologici e di uso del suolo di ciascun bacino. La grossa mole di dati ed il continuo aggiornamento rendono questo metodo molto diffuso negli Stati Uniti e sempre più anche in Europa, grazie anche all'impiego dei software GIS. Tale metodo assume che, in un evento di piena, il volume specifico del deflusso superficiale  $P$ , sia proporzionale a quello precipitato  $I$ , depurato dall'assorbimento iniziale  $I_a$ , in ragione del rapporto tra volume specifico infiltrato  $F$ , e un volume specifico  $S$ , che caratterizza la massima ritenzione potenziale del terreno:

$$P = (I - I_a) \cdot \frac{F}{S}$$

Sostituendo ad  $F$  l'espressione ottenuta dall'equazione di continuità:

$$F = I - I_a - P$$

Si ottiene la relazione che fornisce il deflusso superficiale  $P$  :

$$P = \frac{(I - I_a)^2}{I - I_a + S}$$

Il parametro  $S$  dipende fondamentalmente dalla combinazione di due fattori: la natura geo-pedologica del terreno e l'uso del suolo. L'effetto combinato di questi due fattori viene rappresentato globalmente dal parametro adimensionale  $CN$ , legato a  $S$  dalla relazione:

$$S = 254\left(\frac{100}{CN} - 1\right)$$

Il parametro  $CN$  è definito nell'intervallo ( $0 < CN < 100$ ), i cui limiti hanno i seguenti significati:

- $CN \rightarrow 0$  corrisponde alla situazione limite di una superficie permeabile e quindi estremamente sfavorevole al ruscellamento;
- $CN \rightarrow 100$  corrisponde alla situazione opposta di una superficie impermeabile e quindi estremamente favorevole al ruscellamento.

### 6.5.1 Calcolo del parametro $CN$

La stima del parametro  $CN$  è stata effettuata tramite acquisizione, all'interno del software ArcMap, degli strati informativi riguardanti la litologia, la pedologia, e l'uso del suolo.

A tale scopo si è utilizzato uno strumento sviluppato dallo USGS (United States Geological Survey) appositamente per ArcMap e denominato ArcCN-Runoff [38] il quale permette di operare direttamente con dati vettoriali di tipo shp file.

Per poter ottenere una carta dei valori di  $CN$  tramite tale strumento si è proceduto secondo tre distinte fasi:

1. associazione delle singole classi litologiche (tab. 6.4) ai quattro differenti gruppi idrologici dei suoli A - B - C - D (tab. 6.3) definiti in letteratura e indicati nel metodo del Curve Number per descrivere le proprietà idrogeologiche dei terreni. Le associazioni sono state fatte su base di valutazioni personali nonché delle indicazioni riportate in letteratura relative alle applicazioni del metodo del  $CN$  negli ambienti italiani [39, 40];
2. intersezione tra il tema litologico riclassificato secondo la tabella 6.4 e il tema relativo all'uso del suolo scegliendo come classi il secondo livello della legenda CORINE;

3. associazione, tramite una maschera di controllo dedicata (fig. 6.11), tra i poligoni creati dall'intersezione tra i due temi descritti nel punto due con il database contenente i valori di *CN*. Il database del *CN* è stato creato partendo dai database presenti in letteratura, anche se questi presentano per la maggior parte valori calibrati per aree situate nel continente americano, in alcuni casi utilizzati anche in Italia con le dovute modifiche. Non potendo ottenere dati idrologici reali da utilizzare come riferimento data la grandezza dell'area in esame e i tempi a nostra disposizione, si è deciso di modificare i database presenti, adattandoli alla situazione locale, secondo la propria esperienza personale (tab. 6.5).

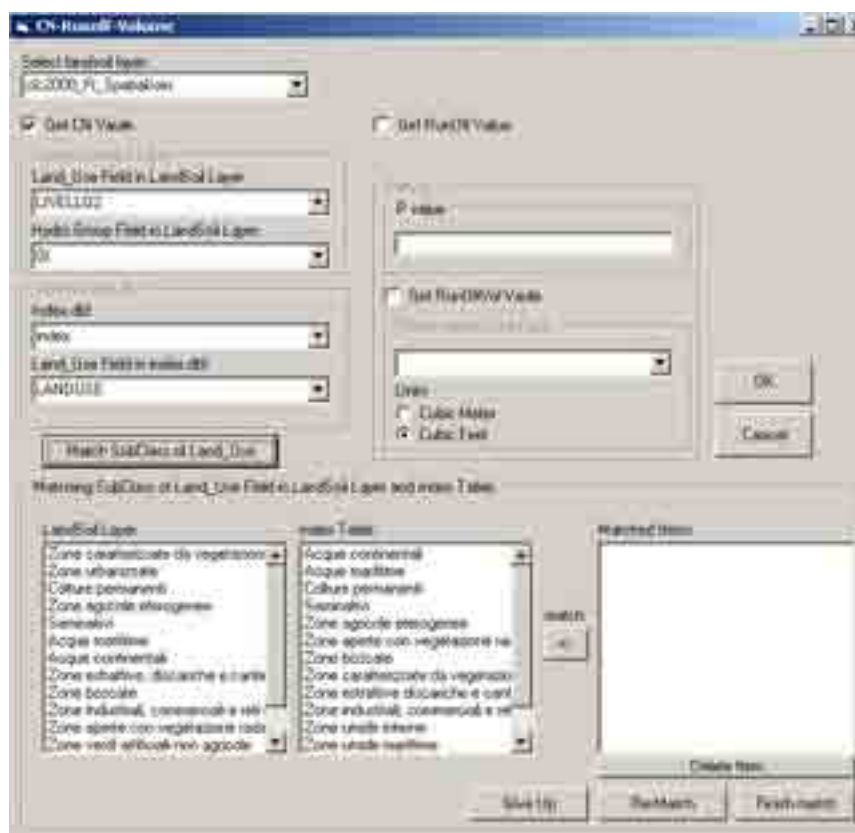
Si è ottenuta così una carta, in formato raster, dei valori di *CN* composta da celle quadrate di 100x100 metri (fig. 6.12). Ogni cella contiene un valore medio di *CN* ottenuto secondo le procedure sopra descritte.

<b>GRUPPO IDROLOGICO DI SUOLO</b>	<b>PROPRIETÀ</b>	<b>DESCRIZIONE</b>
<b>A</b>	<i>potenziale di ruscellamento molto basso</i>	terreni con alta capacità di infiltrazione, anche se completamente saturi e formati essenzialmente da sabbie e ghiaie, ben drenati in profondità.
<b>B</b>	<i>potenziale di ruscellamento basso</i>	Terreni con moderata capacità di infiltrazione, anche se completamente saturi, aventi tessitura fine o moderatamente grossolana, da moderatamente profondi a profondi, da moderatamente a ben drenati.
<b>C</b>	<i>potenziale di ruscellamento moderato</i>	terreni che hanno bassa capacità di infiltrazione quando sono saturi, comprendenti in genere uno strato che impedisce il movimento verticale dell'acqua e aventi tessitura da moderatamente fine a fine.
<b>D</b>	<i>potenziale di ruscellamento elevato</i>	terreni con bassissima capacità di infiltrazione quando saturi, costituiti principalmente da argille; terreni con falda freatica sempre vicina al piano di campagna; coltri sottili su basamento impermeabile.

**Tabella 6.3:** Gruppi di suolo in base alla capacità di assorbimento

LITOLOGIA	GRUPPO IDROLOGICO
Complesso Arenaceo-Argilloso	C
Complesso Argilloso	D
Complesso Carbonatico	C
Complesso clastico di deposizione continentale	B
Complesso Conglomeratico-Arenaceo	A
Complesso Evaporitico	C
Complesso Filladico-Metamorfico	C
Complesso Sabbioso-Calcarenitico	B
Complesso Vulcanico	C

**Tabella 6.4:** Tabella delle classi litologiche associate al relativo gruppo idrologico

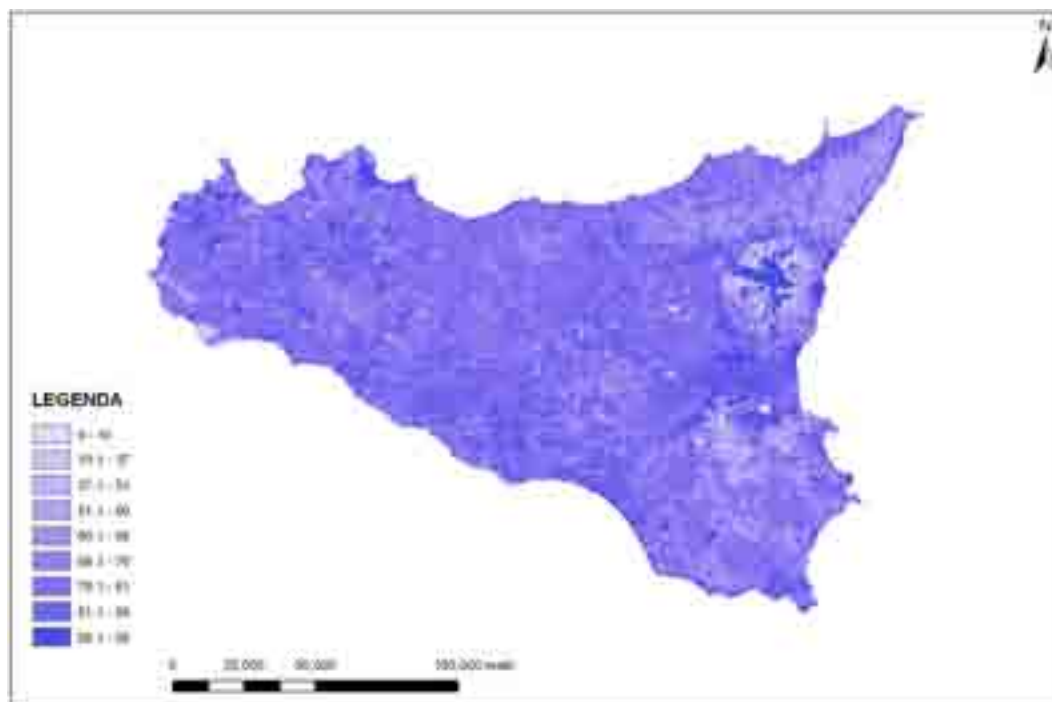


**Figura 6.11:** Maschera di controllo dello strumento ArcCN-Runoff

## CAPITOLO 6. Acquisizione della Cartografia Tematica

VALORI DEL PARAMETRO "CN" (Adimensionale)	GRUPPO IDROLOGICO DI SUOLO			
	A	B	C	D
Tipologia di Uso del Territorio				
Acque continentali	94	10	10	10
Acque marittime	0	10	0	0
Colture permanenti	65	71	85	83
Seminativi	81	81	75	79
Zone agricole eterogenee	79	68	75	78
Zone aperte con vegetazione rada o assente	98	78	74	63
Zone boscate	53	74	71	70
Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	80	78	73	74
Zone estrattive, discariche e cantieri	65	78	55	91
Zone industriali, commerciali e reti di comunicazione	78	93	74	78
Zone umide interne	0	25	25	0
Zone umide marittime	25	25	25	25
Zone urbanizzate	92	63	71	71
Zone verdi artificiali non agricole	0	80	92	58

**Tabella 6.5:** Valori del CN in funzione dell'uso del suolo usati nel presente lavoro.



**Figura 6.12:** Carta dei valori di CN

## 6.6 La Carta dell'Indice di Anomalia Pluviometrica

Le precipitazioni brevi e intense, o eccezionali e prolungate che siano, rappresentano, come evidenziato dalla letteratura tecnico-scientifica, se non il più importante fattore di innesco dei fenomeni franosi sicuramente uno dei fattori scatenanti di attivazione del dissesto da frana, mentre molto meno indicativo è il dato che si riferisce alla piovosità media annuale.

I fenomeni franosi rapidi e superficiali, quali ad esempio i soil-slip e i debris-flow, che interessano soprattutto i terreni di copertura con una permeabilità medio-alta, si innescano principalmente in occasione di eventi pluviometrici brevi ed intensi. Bisogna comunque ricordare che i franamenti innescati con un solo giorno di pioggia sono estremamente pochi e quando avvenuti possono dipendere principalmente dalla quantità di pioggia antecedente l'evento franoso (precipitazioni prolungate). Proprio quest'ultimo tipo di pioggia riveste un ruolo importante in quanto nelle frane con una maggiore profondità della superficie di scivolamento, o che coinvolgono litotipi prevalentemente argillosi, l'acqua infiltrata contribuisce ad una maggiore saturazione del terreno producendo un aumento della pressione interstiziale all'interno dei pori, una diminuzione della resistenza al taglio e di conseguenza una maggiore propensione al dissesto [41, 42, 43].

In letteratura sono presenti molti studi di previsione di pericolosità da frana di tipo deterministico, che si basano sull'unione, per mezzo di opportuni modelli di calcolo, di più tipi di informazioni: caratteristiche geotecniche ed idrologiche del terreno e dati riferiti all'intensità di precipitazione, come ad esempio le soglie pluviometriche di innesco. Per la determinazione delle soglie pluviometriche [44, 45], che rappresentano il valore minimo della variabile idrologica (intensità e durata di pioggia, precipitazione cumulata) per l'innesco del fenomeno franoso, è fondamentale conoscere il giorno e l'ora dell'evento di frana e i valori dell'evento pluviometrico correlato. Tali soglie, valide solo all'interno di un definito ambito territoriale con caratteristiche geologiche e climatiche omogenee, consentono di separare statisticamente il campo di stabilità da quello di instabilità: al di sopra della curva i valori di precipitazione determinano una situazione critica per l'innesco di fenomeni franosi, al di sotto invece prevalgono le condizioni di stabilità. Tutta questa mole di dati è ottenibile tramite campagne di prove in situ e in laboratorio che richiedono un contributo economico e temporale non pensabile in un lavoro del genere.

Nel presente lavoro, purtroppo l'assenza di una banca dati riguardante la data d'innesco di un dataset significativo di frane non ha consentito la costruzione di soglie di

precipitazione [46] e quindi dei relativi modelli di stabilità deterministici.

Si è tentato comunque di parametrizzare il dato pluviometrico come tendenza statistica ad eventi di tipo “favorevole” e a tal proposito è stata eseguita un’analisi pluviometrica finalizzata alla costruzione di una carta dell’*indice di Anomalia Pluviometrica* mediata su un intervallo di studio compreso tra il 1924 e il 1995 [47].

Per indice pluviometrico si intende un insieme particolare di elaborazioni matematiche in grado di riassumere, dal punto di vista numerico la variabile pioggia [18]. Nella formulazione del nostro indice si è considerata principalmente la precipitazione giornaliera, la quale, sebbene risenta delle anomalie orografiche e microclimatiche locali, presenta una distribuzione spaziale abbastanza irregolare. Evidentemente ciò comporta la necessità di riferirsi a dissesti geomorfologici che abbiano stretta attinenza con regimi di precipitazione alla scala giornaliera o pluri-giornaliera e pertanto a frane a cinematica lenta (scorrimenti, colate e frane complesse), che hanno una rilevanza maggiore in tema di protezione civile per gli effetti dannosi che producono.

Un indice pluviometrico utilizzato all’interno di modelli di previsione della suscettibilità al rischio da frana per essere funzionale non deve tenere conto della semplice precipitazione giornaliera ed eventualmente del suo valore massimo, ma dell’anomalia dell’evento meteorologico nel suo insieme.

Dato che in natura un evento meteorico di pioggia non segue una legge specifica, per cui l’altezza totale di precipitazione non sempre cresce proporzionalmente al crescere della durata dell’evento piovoso, può anche avvenire che la quantità di pioggia caduta nelle prime ore dall’inizio dell’evento meteorico sia pari o solo leggermente inferiore alla quantità di pioggia caduta nell’intera giornata. Dal nostro punto di vista un evento breve e intenso con quantitativi elevati di pioggia caduti in poche ore costituisce sicuramente un elemento negativo perché aumenta in maniera cospicua i processi di erosione e quindi di conseguenza l’innescò di fenomeni franosi, ma senza la conoscenza del numero di giorni consecutivi di pioggia antecedenti l’evento catastrofico rimane comunque un dato non del tutto completo perché non tiene conto della quantità di acqua infiltratasi nel terreno nei giorni precedenti l’evento.

Tra gli indici proposti in numerosi lavori di meteorologia si è pensato di formulare un indice semplificato adattato alla situazione locale.

Tale indice denominato “*Indice di Anomalia Pluviometrica ( $I_a$ )*” si basa sul rapporto tra la differenza dei valori di precipitazioni di massima intensità nelle prime 3 ore (mm) e



nelle successive 24 ore (mm) normalizzati sui valori di pioggia giornaliera, di serie storiche di dati sempre superiori a trent'anni, dato che dal punto di vista idrologico trenta anni rappresentano un periodo statisticamente significativo.

La formula, come scritta qui di seguito, rappresenta la media dei valori  $I_a$  calcolati per ogni singolo evento in un determinato pluviometro:

$$I_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{h_{(max24)_i} - h_{(max3)_i}}{h_{(max24)_i}} \right)$$

dove:

$I_a$  → indice di Anomalia Pluviometrica

$n$  → numero di eventi analizzati in un dato pluviometro

$h_{max24}$  → valori di precipitazioni di massima intensità nelle 24 ore

$h_{max3}$  → valori di precipitazioni di massima intensità nelle 3 ore

Come si evince dalla tabella 6.6 per tale indice sono state definite tre classi di rischio in funzione della distribuzione di frequenza del valore medio dell'Indice  $I_a$  all'interno delle frane.

Valori di $I_a$	Classe di Rischio
0 - 0.42	Bassa
0.42 - 0.52	Alta
0.52 - 0.80	Media

**Tabella 6.6:** Classificazione  $I_a$

### 6.6.1 Raccolta dati pluviometrici

Per questo studio sono stati utilizzati i dati compresi nell'intervallo di tempo che va dal 1924 al 1995 del Servizio Idrografico Regionale, che ha nel tempo costituito l'archivio di dati più ricco e più antico esistente in Sicilia, con rilevazioni che partono in qualche caso anche dalla fine del 1800. Delle numerose stazioni termo-pluviometriche presenti in archivio, ne sono state scelte 78 (tab. 6.7) preferendo quelle che consentivano la maggiore copertura possibile del territorio regionale (fig. 6.13), e che presentavano almeno un intero trentennio climatico.

## CAPITOLO 6. Acquisizione della Cartografia Tematica

STAZIONE PLUVIOMETRICA	QUOTA (m)	STAZIONE PLUVIOMETRICA	QUOTA (m)	STAZIONE PLUVIOMETRICA	QUOTA (m)
ACIREALE	194	FRANCAVILLA	319	PETRALIA SOTTANA	932
AGIRA	674	GANZIRRI	3	PIANA DEGLI ALBANESI	744
ALTOFONTE	385	GELA	30	PIANO DEL LEONE	831
AUGUSTA	11	ISOLA DELLE FEMMINE	4	PIAZZA ARMERINA	640
BIRGI NUOVO	20	LENTINA	93	PIETRAPERZIA	467
BIVONA	521	LENTINI	43	RADDUSA	339
BRONTE	780	LEONFORTE	640	RAGUSA	515
CACCAMO	521	LERCARA FRIDDI	658	RAMACCA	257
CALATAFIMI	345	MANIACI	751	ROCCAMENA	480
CALTABELLOTTA	900	MARIANOPOLI	700	SALEMI	200
CALTAGIRONE	608	MARSALA	4	S. ANDREA BONAGIA	55
CALTANISSETTA	597	MAZZARINO	547	S. BIAGO PLATANI	408
CALTAVUTURO	635	MILAZZO	2	S. CATERINA	606
CAPO D'ORLANDO	82	MINEO	546	S.CRISTINA GELA	670
CASTELBUONO	380	MODICA	370	S.MARTINO	570
CASTELVETRANO	190	MONTALBANO ELICONA	929	SCIACCA	118
CASTRONOVO	661	MONTEROSSO ALMO	667	TAORMINA	248
CASTROREALE	383	MONUMENTALE	10	TORTORICI	482
CEFALU'	30	MUSSOMELI		TRAPANI	2
CESARO'	1100	NICOSIA	650	TROINA	1074
CHIUSA SCLAFANI	614	NOTO	76	VALGUARNERA	588
CIMINNA	525	PALAZZOLO ACREIDE	695	VICARI	650
COLLESANO	481	PALAZZO ADRIANO	679	VILLAROSA	518
CORLEONE	588	PARTANNA	407	VITTORIA	168
ENNA	950	PARTINICO	170	VIZZINI	581
FIGUZZA	681	PATERNO'	240	ZAFFERANA ETNEA	590

**Tabella 6.7:** Stazioni di misura pluviometriche

Scelte le stazioni è stata costruita una tabella in formato xls, opportunamente organizzata per la successiva elaborazione, nella quale sono stati inseriti i valori di intensità massima di precipitazioni a tre ore e a ventiquattro ore mediati su serie storiche di dati comprese nel periodo 1924-1995. Successivamente per ogni singola stazione è stato calcolato il valore di Anomalia Pluviometrica ( $I_a$ ).

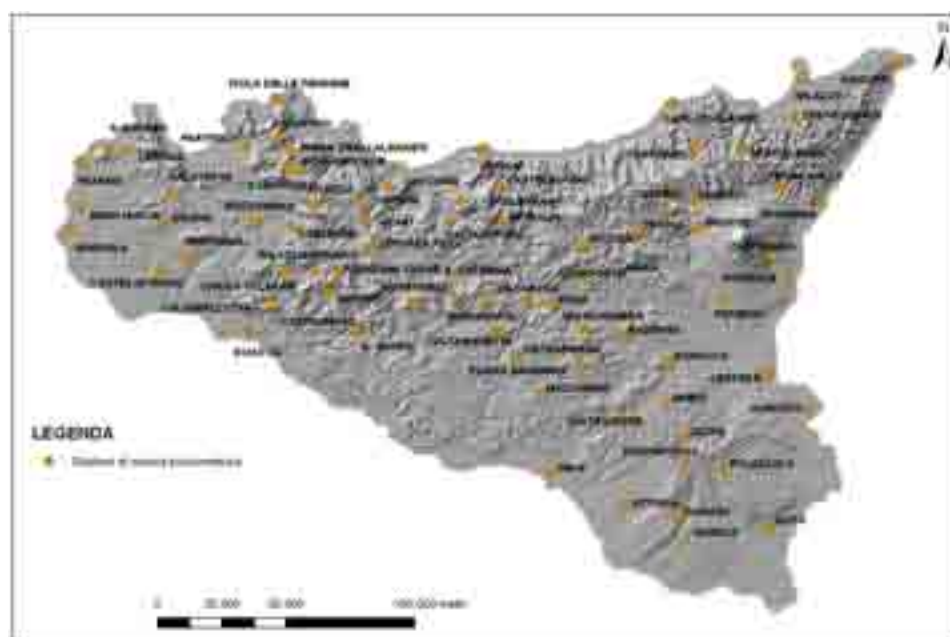


Figura 6.13: Stazioni di misura pluviometrica

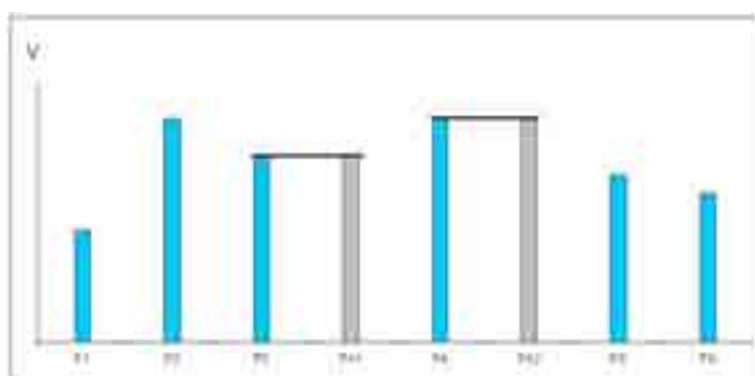
### 6.6.2 Metodologia utilizzata per l'elaborazione della Carta dell'Indice di Anomalia Pluviometrica

Per la realizzazione della carta dell'Indice di Anomalia Pluviometrica è stato necessario passare da un dato di tipo puntuale rappresentato dal valore dell'indice  $I_a$  calcolato per ogni stazione pluviometrica ad un dato spazialmente continuo. Comunemente i metodi di interpolazione si scelgono in funzione delle entità spaziali interessate, per le quali sono definiti valori noti di tipo puntuale. Tra i numerosi algoritmi di interpolazione spaziale presenti in letteratura si è scelto di utilizzare un interpolatore di tipo puntuale meglio conosciuto come interpolatore di tipo "Nearest Neighbor (o del Prossimo più Vicino)".

Gli interpolatori puntuali (*Nearest Neighbor*) a differenza di quelli deterministici (*Spline*) e di quelli stocastici (*Kriging*) non calcolano l'errore commesso nelle previsioni, ma si limitano semplicemente alla ricerca del punto più vicino a quello di interesse.

In ogni processo interpolativo, oltre al metodo usato, diventa uno strumento essenziale anche il software con cui si svolgono le operazioni di calcolo. Nell'ambito di questo lavoro il software utilizzato per l'interpolazione deterministica è stato ArcGIS, che consente l'esecuzione delle operazioni di interpolazione tramite un'interfaccia semplice ed intuitiva.

L'interpolatore *Nearest Neighbor* (o del *Prossimo più Vicino*) si basa sull'assegnare a ciascun punto di valore non noto, il valore della grandezza misurata nel punto più vicino. Un esempio dell'applicazione di questa tecnica in un procedimento di interpolazione in due dimensioni è mostrato in figura 6.14.

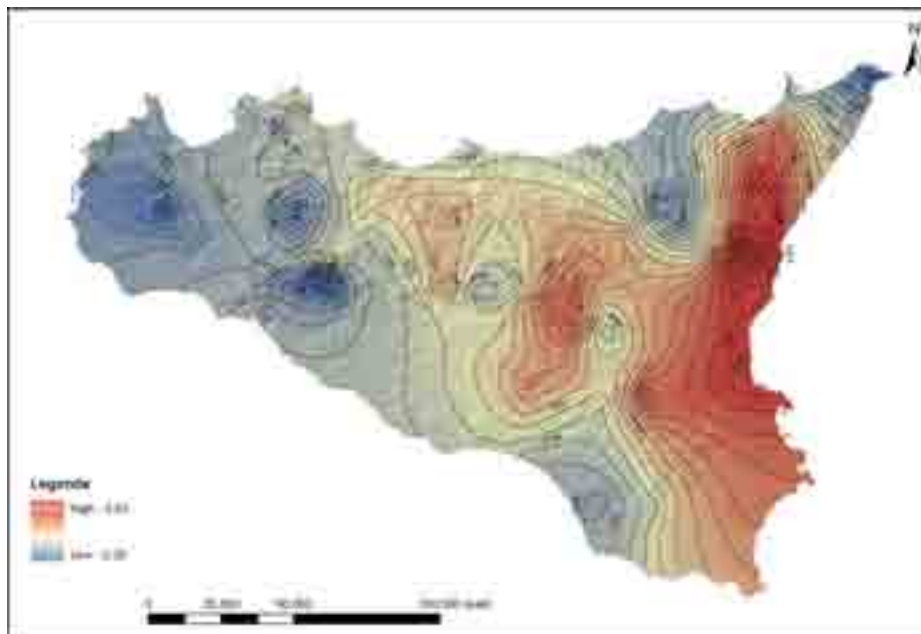


**Figura 6.14:** Esempio della tecnica di *Nearest Neighbor* in due dimensioni

Si vede come viene assegnato ai due punti  $P_{x1}$  e  $P_{x2}$  esattamente lo stesso valore misurato nei punti più vicini, in questo caso  $P_3$  e  $P_4$ . In due dimensioni si tratta quindi di un'operazione molto semplice, che consiste fondamentalmente nella determinazione della distanza del punto di interesse da quelli di valore noto, per trovare quello a distanza minima.

Altri tipi di interpolatori spaziali, come l'interpolatore deterministico di tipo *Spline*, si basano su leggi di corrispondenza radiale che permettano di predire superfici partendo da punti sparsi [48, 49]. Tali metodi sono basati su funzioni matematiche che minimizzano la curvatura dell'intera superficie ideale che passa esattamente per i diversi punti di osservazione. È come se un foglio di gomma passasse esattamente attraverso tutti i punti di

osservazione, con una minimizzazione della curvatura della stessa superficie. Di contro l'interpolatore geostatistico *Kriging* fornisce delle informazioni aggiuntive, potenzialmente interessanti, circa le mappe di distribuzione degli errori e della deviazione standard delle variabili interpolate. Tuttavia, soprattutto per l'interpolazione spaziale di variabili per le quali si dispone di una serie di punti di osservazione caratterizzata da una densità territoriale molto bassa (es. 78 punti di osservazione), tali vantaggi vengono sostanzialmente meno al punto, ripetiamo, da ottenere uguali risultati finali, ricorrendo ad interpolatori più semplici, dal punto di vista della struttura statistica, qual'è appunto il *Nearest Neighbor*. I risultati ottenuti, infatti, sembrano rappresentare bene il reale andamento territoriale del parametro meteorologico in questione (fig. 6.15).



**Figura 6.15:** Carta dell'Indice di Anomalia Pluviometrica



## **Capitolo 7**

# **Omogeneizzazione dei dati geografici acquisiti**

Gran parte dei dati pervenuti, come l'inventario dei fenomeni franosi (IFFI) e l'uso del suolo, sono stati realizzati da Enti esterni e sono stati quindi acquisiti già informatizzati e validati dagli stessi Enti realizzatori. Il nostro ruolo è stato principalmente quello di svolgere un'opera di confronto e verifica della qualità dei dati senza apportare modifiche al dato originario; dove è stato possibile sono stati completati dei relativi METADATI così da renderli maggiormente intellegibili. Tutti i dati sono stati anche omogeneizzati sia tra loro sia con i dati prodotti nel corso della ricerca, così da produrre dati territoriali congruenti fra loro e rispettosi delle specifiche comuni europee ai fini della condivisione dell'informazione geografica. Inoltre, nella prospettiva futura di estendere il progetto a scala nazionale, gli stessi dati sono stati convertiti in un unico fuso (Fuso Italia) senza soluzione di continuità.

Tutte le procedure svolte nel presente lavoro ed esplicitate nel presente capitolo sono da considerarsi di primaria importanza dato che qualsiasi modellizzazione dipende quasi esclusivamente dalla bontà dei suoi dati di input.

### **7.1 La direttiva Europea INSPIRE**

La politica ambientale europea negli ultimi anni ha dato vita ad un ampio sistema di monitoraggio aggiornato e moderno, in grado di rendere le informazioni, all'interno del territorio europeo, facilmente disponibili e di buona qualità.

Da sempre i dati territoriali rivestono un ruolo importante, permettendo di integrare informazioni provenienti da diverse discipline in modo da poterle utilizzare in diversi settori. Una descrizione del territorio coerente, accessibile e di qualità, permette la coordinazione nella fornitura di informazioni in tutta l'Unione Europea. Per questi motivi il 15 maggio 2007 è stata presentata, sia al Parlamento Europeo che al Consiglio dell'Unione Europea, la proposta di direttiva INSPIRE [52] (INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe). Tale direttiva consentirebbe la condivisione di informazioni geografiche e ambientali e la loro messa a disposizione mediante siti internet. Verrebbe così creata una infrastruttura per l'informazione territoriale (ESDI, European Spatial Data Infrastructure) a sostegno sia delle amministrazioni pubbliche che del singolo cittadino.

La direttiva può essere sintetizzata in sei aspetti principali:

- i dati devono essere raccolti e mantenuti ad un livello tale da consentire la massima efficacia;
- deve essere possibile combinare in modo continuo informazioni territoriali provenienti da diverse fonti in Europa e condividerle tra più utilizzatori ed applicazioni;
- deve essere possibile condividere con tutti gli altri livelli<sup>1</sup> le informazioni raccolte ad un dato livello;
- deve essere facile l'individuazione delle informazioni geografiche disponibili per valutarne l'adeguatezza ad un uso specifico e conoscere quali condizioni applicare per il loro uso;
- i dati geografici devono essere di facile comprensione ed interpretazione e si devono poter visualizzare facilmente nel contesto adeguato.

Uno dei principali obiettivi dell'iniziativa INSPIRE è l'ottimizzazione e lo sfruttamento dei dati esistenti tramite la creazione di una valida documentazione.

Tale documentazione viene resa esplicita tramite i *Metadati*<sup>2</sup>, i quali dovranno essere i più completi possibile e riguardare tra l'altro: le condizioni applicabili per l'accesso e

---

<sup>1</sup>con il termine *livello* si fa riferimento a qualsiasi ente o ufficio della pubblica amministrazione.

<sup>2</sup>informazioni che descrivono i dati territoriali e i servizi ad essi relativi e che consentono di registrare, ricercare e utilizzare tali dati e servizi.



l'utilizzo delle informazioni geografiche in questione, la qualità e la validità di queste informazioni, le stesse condizioni di accesso, ed infine le autorità pubbliche responsabili di tali informazioni.

L'interoperabilità è di rilevante importanza perché consente agli stati membri dell'UE di non apportare modifiche ai formati dei dati originali, conservando così i propri sistemi e schemi organizzativi. Per questo motivo la Commissione incaricata deve elaborare delle disposizioni di esecuzione entro e non oltre il 15 maggio 2012 (per quanto concerne, rispettivamente, le informazioni di cui all'allegato I<sup>3</sup>, II<sup>4</sup> e III<sup>5</sup>). L'interoperabilità è raggiungibile solo grazie all'integrazione e a tale scopo la direttiva prevede che siano create delle interfacce comuni per la conversione dei dati territoriali.

È compito degli stati membri creare infrastrutture spaziali a livello nazionale NSDI (National Spatial Data Infrastructure) ed elaborare rapporti sul contenuto entro e non oltre il 15 maggio 2014. È invece compito della direttiva europea gestire il coordinamento di tali infrastrutture ed armonizzarle affinché possano essere fra loro compatibili.

Con l'adozione di questa direttiva, gli stati membri istituiscono e gestiscono servizi di rete per il trasferimento di dati e metadati nonché i servizi ad essi correlati. Tali servizi permettono di effettuare:

1. *ricerche*: sia di dati, sia di servizi relativi ai dati territoriali;
2. *consultazione*: visualizzazione, navigazione, variazione della scala (zoom) e variazione della porzione di territorio visualizzato (pan);
3. *conversione*: di trasformazione di coordinate dei dati.

È inoltre garantita la creazione di metadati sui dati territoriali ed i servizi ad essi legati.

---

<sup>3</sup>**Allegato I**: sistemi di coordinate, sistemi di griglie geografiche, nomi geografici, unità amministrative, indirizzi, parcelle catastali, reti di trasporto, idrografia, siti protetti

<sup>4</sup>**Allegato II**: elevazione, copertura del suolo, ortoimmagini, geologia

<sup>5</sup>**Allegato III**: unità statistiche, edifici, suolo, utilizzo del territorio, salute umana e sicurezza, servizi di pubblica utilità e servizi amministrativi, impianti di monitoraggio ambientale, produzione e impianti industriali, impianti agricoli e di acquacoltura, distribuzione della popolazione - demografia, zone sottoposte a gestione/limitazioni/regolamentazione e unità con obbligo di comunicare i dati, zone a rischio naturale, condizioni atmosferiche, elementi geografici meteorologici, elementi geografici oceanografici, regioni marine, regioni biogeografiche, habitat e biotopi, distribuzione delle specie, risorse energetiche, risorse minerarie

### 7.1.1 Tempi di attuazione

La direttiva prevede 3 fasi:

1. Fase preparatoria (2005 - 2007), nella quale vengono adottati i provvedimenti a livello europeo;
2. Fase di trasposizione (2007 - 2009), nella quale la direttiva Europea viene trasposta in leggi nazionali;
3. Fase di implementazione (2009 - 2019), nella quale le misure, europee e nazionali, verranno implementate e monitorate attraverso report triennali.

### 7.1.2 La situazione Italiana

Ormai da circa dieci anni in Italia gli organi centrali dello Stato, quali il Ministero della Difesa, quello dell'Ambiente e quello dell'Economia e gli organi amministrativi regionali, provinciali e comunali si stanno attivando tramite la stipula di accordi finalizzati alla gestione e alla produzione di dati di informazione geografica a copertura dell'intero territorio nazionale.

Prima della direttiva INSPIRE, e precisamente il 26 settembre del 1996, venne approvata la Conferenza Stato, Regioni e Province Autonome meglio conosciuta come "Intesa GIS"[53]. In questo accordo vennero coinvolti il Centro Nazionale per la Pubblica Amministrazione (CNIPA), l'Associazione Nazionale Comuni Italiani (ANCI) e l'Unione delle Province d'Italia (UPI) oltre ai maggiori produttori di informazione geografica italiani tra cui l'Istituto Geografico Militare (IGM), l'Istituto Idrografico della Marina (IIM) e il Centro Informazioni Geotopografiche Aeronautiche (CIGA).

L'obiettivo primario di Intesa GIS era ed è *"lo sviluppo di interventi coordinati per realizzare in Italia entro 6 - 8 anni le basi informative territoriali gestite su elaboratore a copertura dell'intero territorio nazionale, necessarie per l'esercizio delle funzioni di interesse locale, regionale e nazionale"*.

Questo obiettivo è stato tradotto nella produzione di specifiche tecniche comuni che regolassero la creazione di dati geografici e la relativa archiviazione in adeguati cataloghi cartografici.

Con l'accordo del maggio 2006 si ha l'inizio della svolta. Il Comitato tecnico dell'Intesa Stato Regioni e, successivamente, il Comitato per il coordinamento informatico dei dati territoriali realizzano i documenti di Specifica per la creazione di moderni e completi Database topografici (DB) che permettono una strutturazione dei dati più complessa. Nell'aprile 2009 l'allegato 2 del DPCM sul "*Regolamento recante regole e tecniche per la definizione del contenuto del Repertorio nazionale dei dati territoriali, nonché delle modalità di prima costituzione e di aggiornamento dello stesso*" detta le regole nazionali per la formazione e l'alimentazione dei dati territoriali italiani, dando finalmente sostanza alla direttiva INSPIRE. Il coordinamento per l'attuazione delle specifiche presenti nel suddetto regolamento viene affidato al Centro Nazionale per Informatica nella Pubblica Amministrazione (CNI-PA) il quale si adegua imponendo alle amministrazioni l'adozione dello standard ISO19115 per la creazione del metadato territoriale.

La scelta della norma ISO19115 come riferimento ai metadati geografici è una scelta condivisa da parecchi Stati dell'Unione Europea. Questo standard fa parte degli standard prodotti da ISO/TC211, presenti nella direttiva INSPIRE, e definisce gli schemi necessari per descrivere le informazioni geografiche ed i servizi, fornendo informazioni relative all'identificazione, all'estensione, alla qualità e agli schemi temporali e spaziali. All'interno di ISO19115 viene adottato XML come standard per la realizzazione e l'interscambio digitale dei metadati.

Nonostante gli sforzi effettuati negli ultimi anni per adeguarci alla normativa, siamo purtroppo ancora notevolmente indietro rispetto allo standard degli altri stati europei; infatti a tutt'oggi ancora non si ha:

1. nessuna informazione per quanto riguarda la qualità dei dati di riferimento e dei dati tematici;
2. anche se il formato ufficiale per il trasferimento dei dati è il GML[54] (proposto dal consorzio OpenGIS), da quando la ESRI ha reso disponibili online le specifiche dello shp file, questo è rimasto il formato proprietario più utilizzato per l'interscambio dei dati;
3. l'italiano costituisce prevalentemente l'unica lingua; solo alcuni portali supportano documentazione in più lingue: esempio quasi unico in tal senso è il sito delle rete civica dell'Alto Adige che offre contenuti in inglese, tedesco, italiano, francese e ladino;

4. i metadati sono quasi assenti, e se esistenti sono molto eterogenei nel formato e nella qualità.

Riassumendo si evince come, a piccoli passi, la realtà italiana stia tentando di adeguarsi alla realtà europea, producendo lentamente dei primi risultati, pur se ancora incompleti.

## 7.2 I sistemi di riferimento cartografici italiani

Uno dei problemi riscontrati maggiormente nell'impiego di dati eterogenei in Italia, e quindi anche durante l'esecuzione del presente lavoro è stata la forte discrepanza dei dati, disponibili in svariate forme di banche dati (quasi mai corredati dai relativi *Metadati*) e in sistemi di riferimento cartografico differenti. La totale assenza di metadati ha comportato non pochi problemi, soprattutto nel riconoscimento del sistema di riferimento cartografico.

Quando si usano termini come “omogeneità di dati prettamente geografici” ci si riferisce principalmente ed in primo luogo all'adozione di un unico sistema di coordinate, cioè di un unico linguaggio comune nella localizzazione e nel posizionamento delle informazioni territoriali. Un efficace ed esplicito sistema di riferimento, inteso come base geometrica omogenea estesa a tutto il territorio nazionale, è dunque uno strumento indispensabile per un appropriato e corretto uso delle informazioni territoriali [55].

In Italia la coesistenza di molteplici sistemi di riferimento ha spesso portato i diversi enti, produttori di dati sia pubblici che privati, ad un uso improprio dei sistemi di riferimento. Siamo arrivati al paradosso che in alcuni casi i sistemi di riferimento classici vengono revisionati tramite soluzioni informatiche e adattati all'uso interno di quello o di codesto ufficio, creando una sorta di disorientamento e confusione sull'uso corretto delle coordinate e della reale natura dei relativi sistemi di riferimento.

Gli operatori GIS reclamano sempre più una semplificazione degli attuali sistemi di riferimento in uso in Italia tramite la costituzione di un sistema appropriato, immediatamente utilizzabile e che consenta di correlare le informazioni e di facilitare le comunicazioni dei lavori nazionali e internazionali [56].

Quando si lavora in ambiti di limitata estensione (scala di bacino o al massimo regionale) sull'ordine di centinaia di  $km^2$ , la georeferenziazione continua ed omogenea delle informazioni non presenta formalmente alcun problema. Diversa è la situazione quando le applicazioni devono estendersi a scala nazionale. In questo caso è allora necessaria una riflessione sui problemi della standardizzazione del sistema di riferimento in una visione unitaria che prescindendo dalle differenti sorgenti di dati e tenga conto della loro comune destinazione.

L'Italia è uno dei paesi più ricchi di sistemi di coordinate e proprio la mancanza nel passato di una visione globale è stata una delle cause determinanti di questo stato di cose creando errori ed equivoci sempre più frequenti.

Per valutare i danni e la confusione che questo stato di cose ha creato è sufficiente comprendere che la potenzialità di un sistema informativo è basata soprattutto sulla possibilità di correlare informazioni di vario tipo secondo logiche flessibili e adattabili alle specifiche esigenze dell'utente. La particolarità dei sistemi informativi geografici consiste nel fatto che le informazioni, oltre ad avere una definizione quantitativa e qualitativa intrinseca, sono anche collocate spazialmente, cioè definite con affidabilità nota nella loro posizione spaziale rispetto ad un sistema di riferimento assegnato. È allora intuitivo che uno dei più potenti strumenti di correlazione tra le informazioni è certamente costituito dalle coordinate che a ciascuna informazione vengono assegnate per definire la posizione e attraverso cui si possono determinare relazioni di vicinanza, influenza, conflitto e appartenenza. Tale potere di correlazione è pienamente sfruttabile qualora, prima dell'immissione delle informazioni, sia stato correttamente definito il sistema di riferimento.

Solo a tali condizioni la correlabilità spaziale tra dati qualitativi potrà diventare strumento efficace di ricerca e interrogazione; e solo a tali condizioni si potrà sfruttare compiutamente l'ingente patrimonio di dati territoriali già acquisito.

Risulta quindi necessario esaminare e porre rimedio a quei problemi posti dall'esistenza, storicamente consolidata, di differenti sistemi di riferimento rispetto ai quali sono referenziati i dati territoriali.

### **7.2.1 Il Sistema di riferimento Roma40 e la rappresentazione conforme di Gauss-Boaga**

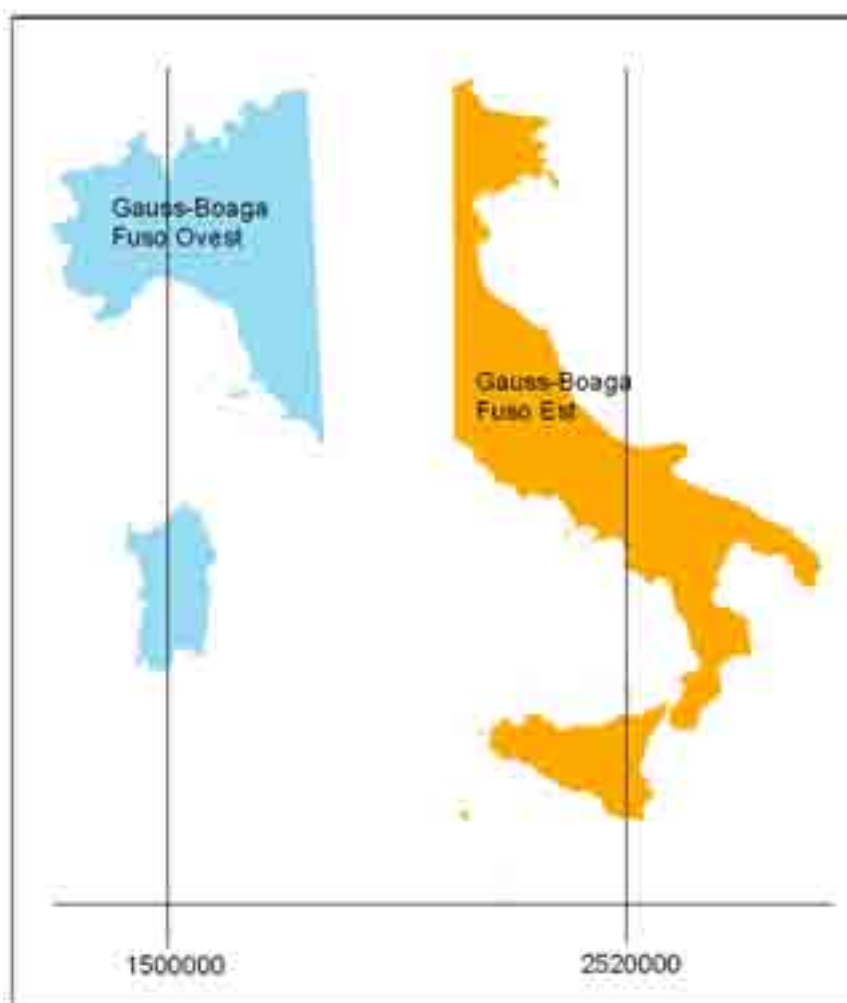
Il sistema di riferimento ROMA40 [57], conosciuto anche come Sistema Nazionale, risale al 1940, anno in cui la Commissione Geodetica Italiana adotta l'ellissoide di Hayford 1909 (o ellissoide internazionale 1924) come superficie di riferimento, con i seguenti parametri identificativi:

- semiasse maggiore:  $a = 6378388$  m
- schiacciamento:  $s = 1/297$

In tale sistema l'orientamento dell'ellissoide è impostato sulla verticale del punto Roma Monte Mario (con azimut su Monte Soratte), caratterizzato dai seguenti valori astronomici:

- latitudine:  $41^{\circ}55'25.51''$
- longitudine:  $0^{\circ}(12^{\circ}27'08.40''\text{Greenwich})$

Per la sua rappresentazione piana è stata adottata la rappresentazione conforme di Gauss (adattata per l'Italia da Boaga) (fig. 7.1) con fattore di riduzione o meglio fattore di scala sul meridiano centrale pari a  $m_0 = 0.9996$ , così da contenere il modulo di deformazione che assume il valore massimo di circa 1.0004 (tab. 7.1).



**Figura 7.1:** Il sistema di riferimento cartografico Gauss-Boaga

Distanza dal meridiano centrale (km)	Lunghezza cartografica (m)	Deformazione lineare (cm)
0	999.60	-40
50	999.63	-37
100	999.72	-28
200	1000.09	9
250	1000.37	37

**Tabella 7.1:** Variazioni delle deformazioni lineari nella rappresentazione di Gauss-Boaga

Questo sistema conosciuto come rappresentazione di Gauss-Boaga si compone di due fusi a coprire tutto il territorio nazionale, ogni fuso ha una ampiezza di  $6^{\circ}30'$ , rispettivamente indicati come fuso Ovest e fuso Est. Per evitare di esprimere con coordinate negative punti situati ad occidente dei due meridiani centrali sono state adottate due false origini pari a 1500000 metri per il fuso Ovest e 2520000 metri per il fuso Est.

Tutte le coordinate della rete trigonometrica fondamentale italiana sono state calcolate nel sistema geodetico nazionale ROMA40 - Gauss-Boaga.

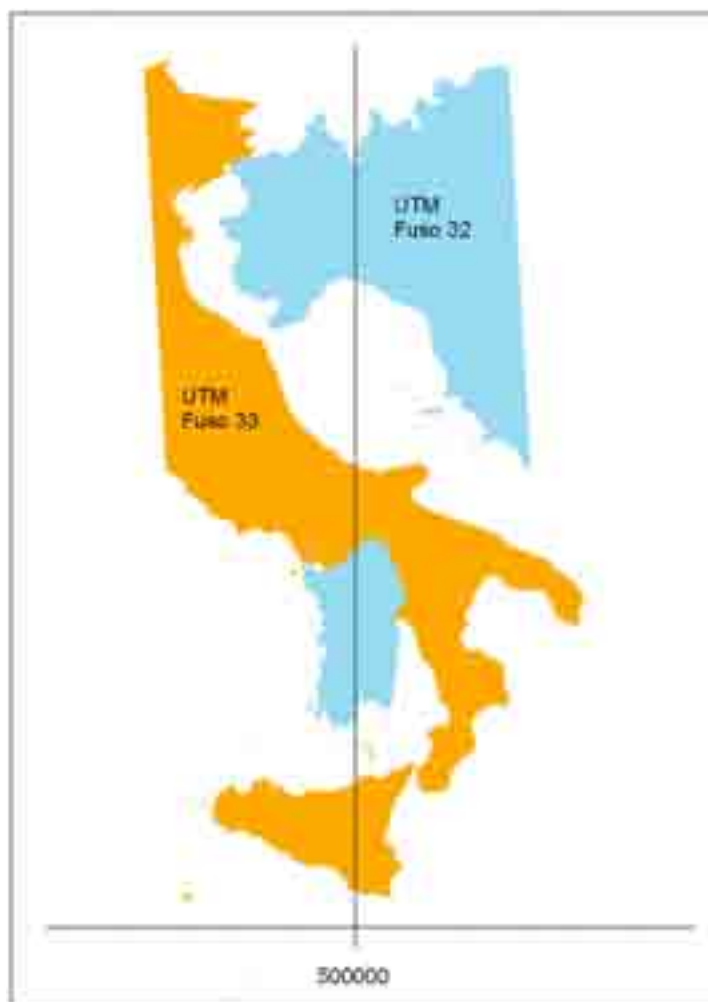
### 7.2.2 Il Sistema di riferimento ED50 (European Datum 1950) e la rappresentazione UTM (Universale Trasversa di Mercatore)

Il sistema di riferimento ED50 [58] nasce con l'esigenza di coordinare le cartografie dei vari paesi europei del secondo dopoguerra, anch'esso utilizza come superficie di riferimento l'ellissoide di Hayford ed è orientato a Postdam (Berlino). Le longitudini sono misurate dal meridiano fondamentale di Greenwich mentre le latitudini dall'equatore. Le coordinate geografiche su Roma Monte Mario sono:

- latitudine:  $41^{\circ}55'31.48''$
- longitudine:  $12^{\circ}27'10.93''$  (*Greenwich*)

La rappresentazione piana del sistema ED50 (fig. 7.2) avviene attraverso il sistema cartografico UTM (Universale Trasversa di Mercatore), che altro non è che la rappresentazione conforme di Gauss.





**Figura 7.2:** Il sistema di riferimento cartografico UTM-ED50 e UTM-WGS84

Il sistema UTM prevede la suddivisione della superficie terrestre in 60 fusi aventi ciascuno ampiezza di  $6^\circ$  di longitudine. L'Italia ricade nei fusi 32, 33 e 34. Il fattore di scala sul meridiano centrale è per tutti i fusi pari a 0.9996. Essendo presente nel fuso 34 solo la porzione di territorio relativa alla penisola Salentina, questo è stato soppresso estendendo gli altri due fusi di  $30'$ . La falsa origine per le coordinate Est è uguale per tutti i 60 fusi ed è pari a 500000 metri. La denominazione corretta del sistema cartografico ED50 è UTM-ED50 e non ED50 o UTM; oggi a maggior ragione è indispensabile usare tale denominazione per poterla distinguere dal sistema cartografico UTM-WGS84.

### **7.2.3 Il Sistema di riferimento WGS84 (World Geodetic System 1984) e la rappresentazione UTM (Universale Trasversa di Mercatore)**

Il sistema di riferimento WGS84 [59] è un sistema globale geocentrico, definito attraverso osservazioni spaziali e costituito da una terna cartesiana destrorsa con origine coincidente con il centro di massa della Terra, l'asse Z è diretto verso il polo Nord convenzionale al 1984, l'asse X è passante per il meridiano fondamentale di Greenwich al 1984 e l'asse Y è diretto in modo tale da completare una terna destrorsa. A questo sistema è associato l'ellissoide WGS84 con centro e assi coincidenti con quelli della terna cartesiana.

La realizzazione a livello mondiale del sistema WGS84 è gestita dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti, mentre in ambito europeo la realizzazione del WGS84 è costituita dall'ETRS2000 (EUREF Terrestrial Reference System 2000), un sistema solidale con la placca eurasiatica, definito sul terreno da una serie di punti determinati con una compensazione d'insieme delle misure satellitari e spaziali disponibili al 2000.

Le coordinate geografiche su Roma Monte Mario sono:

- latitudine:  $41^{\circ}55'27.85''$
- longitudine:  $12^{\circ}27'07.65''$  (*Greenwich*)

La rappresentazione piana del sistema WGS84 (fig. 7.2) avviene anch'essa attraverso il sistema cartografico UTM, sempre diviso in 60 fusi ognuno di  $6^{\circ}$  di ampiezza. L'Italia ricade nei fusi 32, 33 ed il fattore di scala sul meridiano centrale è per tutti i fusi pari a 0.9996. Anche in questo caso la falsa origine per le coordinate Est è uguale per tutti i 60 fusi ed è pari a 500000 metri.

### **7.2.4 L'estensione dei fusi e il progetto del fuso unico (FUSO ITALIA)**

Per chi lavora con dati a scala nazionale il problema della discontinuità dei dati generata dal frazionamento in fusi distinti (32 e 33 o Ovest e Est) è di non facilissima risoluzione. Una delle tecniche maggiormente adottate per ovviare a tale problema, suggerita *in primis* dal Ministero dell'Ambiente, è stata quella della semplice estensione di un fuso sull'altro (ad esempio il fuso UTM 32 sul 33) fino a coprirlo totalmente, conservando le condizioni del fuso sopravvissuto. Se si dovesse procedere in questo modo, secondo Gauss [60] il

meridiano centrale diverrebbe un meridiano eccentrico, poiché il territorio interessato si estenderebbe per 3° ad ovest e per ben 9° ad est.

In questo caso si avrebbero due significativi effetti negativi:

1. l'aumento progressivo delle deformazioni cartografiche con valori di  $m_0$  (fig. 7.3) inaccettabili, al punto che al margine est del fuso esteso il fattore di scala raggiungerebbe il valore di 1.00769, il che vuol dire che in Puglia una lunghezza sul terreno di 3 km subirebbe una dilatazione cartografica di 23 m, rendendo impossibile qualsiasi tentativo di sovrapposizione con la cartografia esistente.
2. le formule adoperate per la normale applicazione della rappresentazione di Gauss non garantirebbero le precisioni garantite con fusi di 6°; si avrebbe anche una forte disomogeneità di precisione tra la parte di territorio rappresentata nel fuso di appartenenza (6°) e la parte restante (~ 6°) inglobata e deformata.

Inoltre le coordinate assegnate nel fuso esteso non risulterebbero distinguibili con immediatezza da quelle dei fusi ufficiali, creando così rischi di ulteriore confusione.

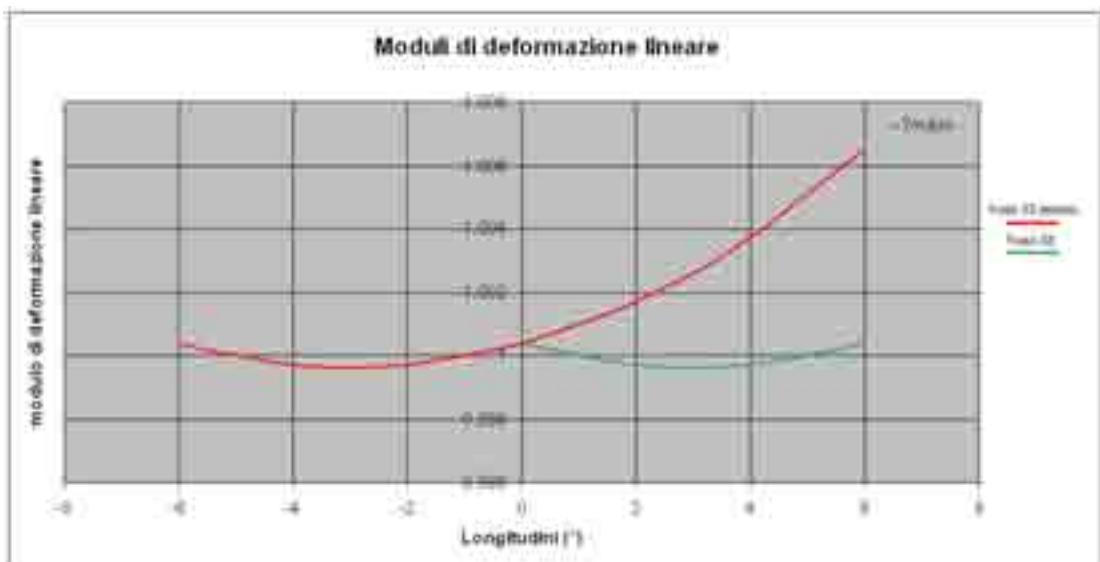
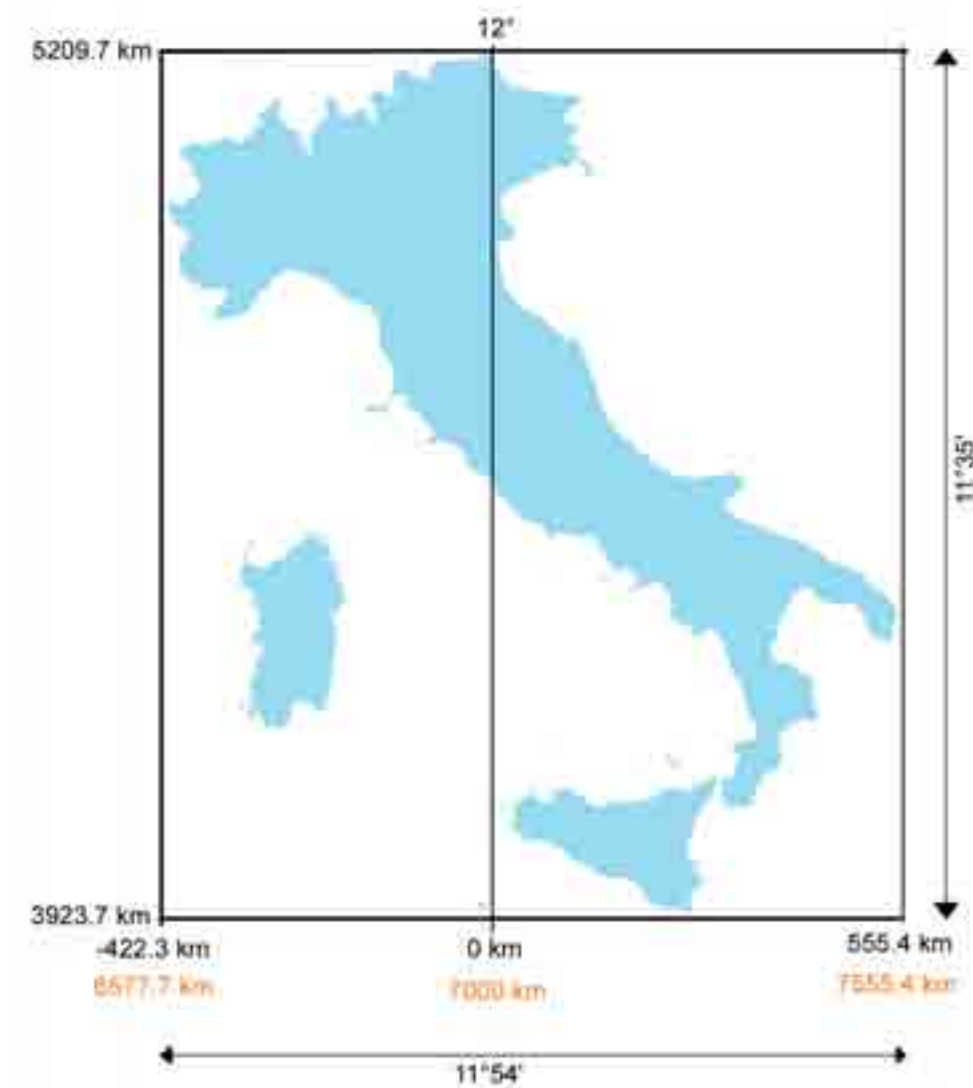


Figura 7.3: Modulo di deformazione lineare sul fuso 32 esteso

Da quanto appena detto si evince che il superamento di tale problema può avvenire solo progettando un unico fuso di rappresentazione per tutto il territorio nazionale. Altre nazioni,

come per esempio la Francia, hanno affrontato il problema già da parecchio tempo introducendo un sistema cartografico unificato per le esigenze delle applicazioni informatiche a copertura nazionale denominato “Lambert II étendu”.

L’Istituto Geografico Militare (IGM) nel 2004 ha progettato un nuovo sistema cartografico denominato Fuso Italia (fig. 7.4) [61].



**Figura 7.4:** Il sistema cartografico Fuso ITALIA

Tale progetto ha lo scopo di soddisfare le esigenze di trattamento dei dati relativi all’insieme del territorio regionale in un sistema cartografico unico, nonché di riconoscibilità

immediata del sistema di appartenenza per evitare confusione e consentirne la coesistenza con i sistemi già definiti e rispondenti a standard internazionali, in linea con la direttiva europea (INSPIRE).

La rappresentazione di Gauss deve essere modificata in relazione all'ampiezza del territorio italiano che si estende per circa  $11^{\circ}35'$  in latitudine e  $11^{\circ}54'$  in longitudine. Da ciò ne deriva che le prime modifiche da approntare sono legate alla scelta del meridiano centrale, che per ovvie ragioni non può che essere il  $12^{\circ}$  a est di Greenwich (nel sistema WGS84), per tenere anche conto dell'esigenza di compatibilità modulare con la rappresentazione UTM.

Per quanto riguarda il valore da assegnare alla falsa origine Est bisogna esaminare come variano la coordinata x e la coordinata y: per quanto riguarda la x i valori vanno da 3923.7 km a 5209.7 km, mentre per la y variano da -422.3 km a 555.4 km (fig. 7.4). Tali condizioni portano ad assegnare un valore  $E_0$  di falsa origine uguale a 7000 km. Per quanto riguarda invece il valore ottimale da assegnare al fattore di scala sul meridiano centrale è stato scelto il valore 0.9985 (fig. 7.5) che permette una simmetrizzazione delle deformazioni mantenendo uguali la massima dilatazione e la massima contrazione. Quindi si avrà una contrazione massima sul meridiano centrale di 1.5 metri per chilometro, uguale in valore assoluto alla massima dilatazione che si verifica sui meridiani marginali; tali variazioni di deformazione sono riassunte nella tabella 7.2.

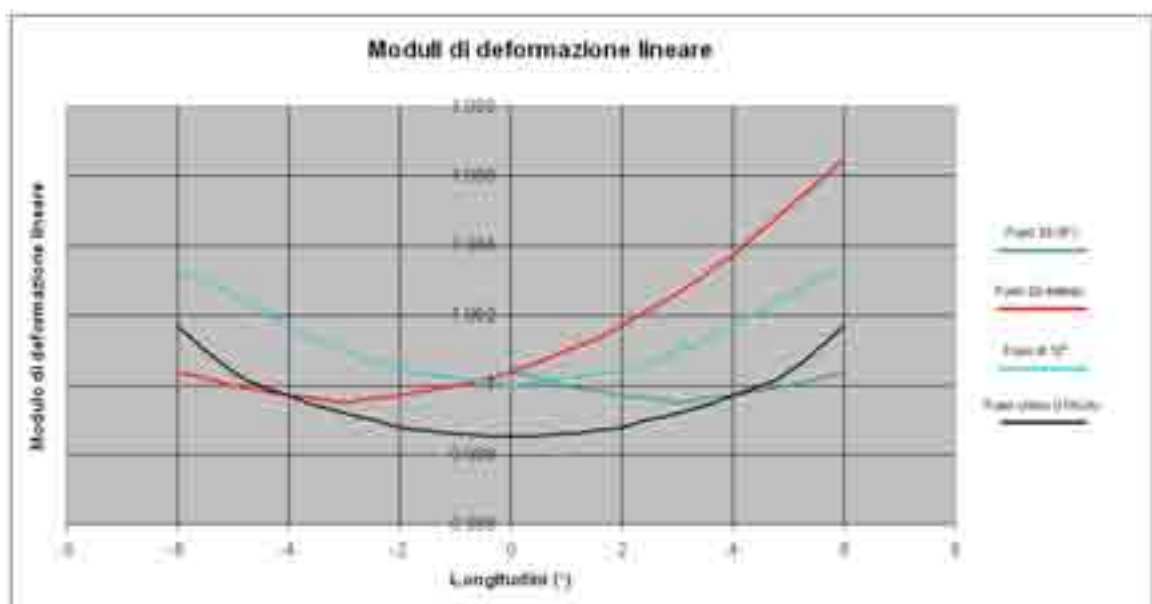


Figura 7.5: Moduli di deformazione lineare sui fusi di  $6^{\circ}$  e  $12^{\circ}$  di ampiezza

Distanza dal meridiano centrale (km)	Lunghezza cartografica (m)	Deformazione lineare (cm)
0	998.50	-150
100	998.62	-138
200	998.99	-101
300	999.59	-41
400	1000.44	44
500	1001.50	150

**Tabella 7.2:** Variazioni delle deformazioni lineari nel Fuso ITALIA

Tale nuovo sistema così strutturato e definitivamente denominato FUSO ITALIA, si può considerare a tutti gli effetti un nuovo sistema cartografico con coordinate immediatamente utilizzabili e con errori cartografici ridotti al minimo, per cui tutti i dati riferiti in sistemi nazionali e sub-nazionali dovrebbero essere convertiti in questo nuovo e unico sistema di riferimento in grado di superare la discontinuità della cartografia ufficiale italiana. A tal proposito in questo lavoro, tramite software ufficiale dell'IGM (VERTO 2000) e tramite script dedicati per quanto riguarda i dati raster GRID, tutti i dati sono stati convertiti in UTM WGS84 FUSO ITALIA.

## Capitolo 8

# I Principi base dei Modelli Statistici Multivariati

L'analisi dei processi franosi necessita di una risoluzione spaziale elevata; la dimensione massima delle celle non dovrebbe essere mai superiore a 20x20 metri. La Sicilia copre circa 25.428 km<sup>2</sup>, cioè circa 64 milioni di celle 20x20 metri. È evidente che numeri del genere rendono computazionalmente difficile l'applicazione di modelli fisicamente basati; sono invece più adatti a questa scala i metodi statistici. Tra quelli maggiormente diffusi troviamo quelli di tipo discriminante, regressivo e logistico che si basano sullo studio delle relazioni fra i fattori di instabilità e le distribuzioni delle frane, analizzando anche le relazioni di influenza esistenti fra i parametri di franosità. I difetti principali dei metodi statistici sono già stati accennati nel capitolo precedente: per la loro applicazione è necessaria la presenza di dati sperimentali di alta qualità, altrimenti non è scontata la bontà del risultato. Nell'utilizzo di modelli statistici vale sempre l'assunto che *“non essendoci nessun contributo della fisica dell'evento, i modelli statistici possono imparare solo quello che i dati insegnano loro”*.

### 8.1 La Regressione Lineare Semplice e Multipla

Il modello di Regressione Lineare consente di analizzare la relazione causale tra una variabile dipendente quantitativa (misurata su scala almeno ad intervalli) e una o più variabili indipendenti quantitative. Dal momento che non è possibile indagare nella popolazione la presunta relazione tra le variabili considerate, per la verifica delle ipotesi si procede estraen-

do un campione rappresentativo della popolazione e descrivendo su questo la relazione tra le variabili considerate. Successivamente, mediante la statistica inferenziale, si verifica se la relazione descritta al livello campionario può essere generalizzata alla popolazione di riferimento.

Nell'analisi della *Regressione Lineare Semplice* è possibile verificare se due variabili sono legate da una relazione di tipo lineare e verificare la forza della relazione. In termini formali, la relazione lineare tra due variabili può essere descritta dall'equazione:

$$Y = \alpha + \beta X \quad [1]$$

dove  $Y$  (**variabile dipendente**) è la variabile che deve essere prevista,  $X$  (**variabile indipendente**) è la variabile i cui valori vengono utilizzati per prevedere  $Y$ , mentre  $\alpha$  e  $\beta$  sono i parametri della popolazione che devono essere stimati e che indicizzano la relazione tra le variabili considerate.

In particolare, il parametro  $\alpha$ , detto anche **intercetta**, rappresenta il valore di  $Y$  quando  $X = 0$ . Il parametro  $\beta$ , detto anche **coefficiente di regressione**, rappresenta il cambiamento di  $Y$  per ogni variazione unitaria di  $X$  o l'inclinazione della retta che rappresenta meglio la relazione tra  $X$  e  $Y$ . Per tale ragione il valore di tale parametro dipende anche dall'unità di misura delle variabili.

Nella *Regressione Lineare Multipla* ci sono molte variabili indipendenti (predittori) e una variabile dipendente. Se  $k$  denota il numero di variabili indipendenti allora l'equazione che descrive la relazione tra le variabili indipendenti e la variabile dipendente diventa:

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k \quad [2]$$

dove  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  diventano *coefficienti di regressione parziali* e riflettono il fatto che ognuno dei predittori  $X_1, X_2, \dots, X_k$  fornisce una predizione della variabile dipendente  $Y$ .

È importante sottolineare che per una maggiore correttezza, sia nella regressione lineare semplice sia nella regressione lineare multipla, l'equazione andrebbe scritta includendo il termine d'errore relativo alla previsione della variabile dipendente. Pertanto la formula corretta diventa:

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad [3]$$

In questo modo, infatti, si riconduce il modello alla sua natura *probabilistica*.

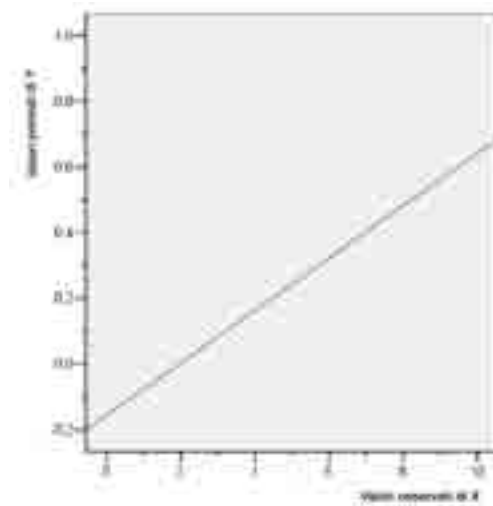


### 8.1.1 La stima dei parametri

Nell'analisi della regressione lineare multipla il primo passo prevede la valutazione dei parametri. Le stime dell'intercetta  $\alpha$  e del coefficiente di regressione ( $\beta$  o  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ ) sono ottenute matematicamente utilizzando il **metodo dei minimi quadrati - OLS (Ordinary Least Square)**, che consiste nel trovare per quali valori di  $\alpha$  e  $\beta$  risulta minima la quantità  $\sum \varepsilon^2$ , cioè si propende a ridurre al minimo l'errore di misura.

## 8.2 La Regressione Logistica Semplice e Multipla

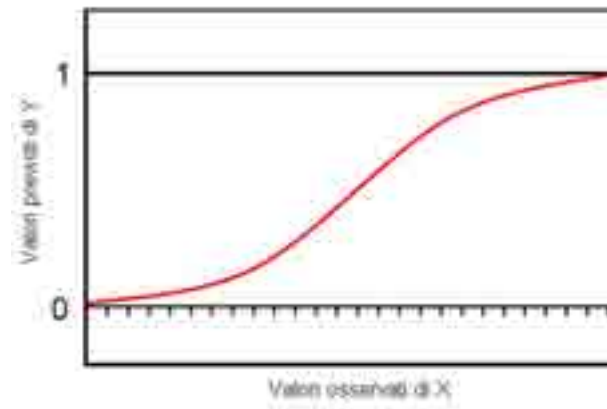
Il modello di Regressione Logistica viene utilizzato quando si è interessati a studiare o analizzare la relazione causale tra una variabile dipendente dicotomica e una o più variabili indipendenti quantitative e qualitative. Quando la **variabile dipendente è dicotomica**, e codificata come 0 - 1 (ad es. risposta giusta = 1, risposta sbagliata = 0 oppure area in frana = 1, area non in frana = 0), la distribuzione teorica di riferimento non dovrebbe essere più la normale ma la *distribuzione binomiale*. In questi casi, quindi, sebbene sia ugualmente possibile applicare il modello della *Regressione semplice*, da un punto di vista matematico, un modello non lineare sarebbe più appropriato. Infatti, nella sua formulazione ( $Y = \alpha + \beta X$ ), il modello lineare implica che i valori della variabile dipendente  $Y$  possano andare da  $-\infty$  a  $+\infty$ . Se ad esempio si considera il grafico riportato in figura 8.1, in cui un modello di regressione lineare è stato adattato con una variabile dipendente dicotomica, e si segue la linea di tendenza determinata dal modello lineare, possiamo notare che all'aumentare dei valori di  $X$  saranno previsti valori di  $Y$  maggiori di 1, e che al decrescere dei valori di  $X$  il modello prevede per  $Y$  valori inferiori a 0.



**Figura 8.1:** Modello di regressione lineare semplice con una variabile dipendente dicotomica

Tale previsione risulta non adeguata alla variabile dipendente che, come detto, può assumere esclusivamente valori 0 - 1. In pratica, se la variabile dipendente è dicotomica, e se è influenzata dalla variabile  $X$ , allora si dovrebbe osservare che per valori molto alti di  $X$  (o molto bassi se la relazione è negativa) il valore di  $Y$  dovrebbe essere molto vicino ad 1

e non dovrebbe superare tale limite. Lo stesso dovrebbe avvenire in prossimità dello 0. In pratica la curva che rappresenta la relazione tra  $X$  e  $Y$  dovrebbe essere di tipo **logistico** (fig. 8.2) e non lineare.



**Figura 8.2:** Curva di Regressione Logistica

In questi casi, dunque, sarebbe più opportuno adattare un modello di regressione non-lineare. Tra l'altro, la **non linearità** della relazione tra le variabili non consente di poter applicare il metodo OLS a meno che non si proceda ad opportune trasformazioni che rendano lineare la relazione. Si tratta quindi di rendere lineare la relazione nei termini dei parametri.

Una delle trasformazioni possibili è, ad esempio, la **trasformazione logaritmica** della variabile dipendente. Prima di illustrare i passaggi che portano alla linearizzazione della relazione è necessario aprire una breve parentesi per fare alcune considerazioni relative alla variabile dipendente considerata.

Nella regressione logistica la **variabile dipendente** definisce l'appartenenza a un gruppo (o all'altro). I valori che vengono assegnati a ciascuna classe di ciascuna variabile dipendente sono attribuiti in maniera arbitraria. Ciò che interessa, dunque, non è il valore atteso (o predetto), come nella regressione lineare, **ma la probabilità** che un dato soggetto appartenga o meno a uno dei due gruppi.

Nonostante questo, è importante sottolineare che la scelta dei valori da assegnare influenza i risultati dell'analisi. Un modo per risolvere il dilemma dell'assegnazione dei valori alle classi è quello di sostituire la probabilità con l'**odds**.

L'*odds* è un modo di esprimere la probabilità mediante un rapporto ossia il rapporto fra la probabilità che  $Y$  assuma valore 1 e quella che assuma valore 0

Per valutare il legame fra  $Y$  ed  $X$  cioè quanto è più probabile che sia osservato  $Y = 1$  quando  $X = 1$  anziché quando  $X = 0$  (valutare cioè l'associazione tra due variabili) è possibile utilizzare un altro indice chiamato *odds ratio* o rapporto tra gli *odds*. Tale indice si ottiene facendo un rapporto tra gli odds di una data variabile (ad esempio la  $Y$ ) ottenuti per ciascuna classe della seconda variabile (ad esempio la  $X$ ).

Infine, una volta calcolato l'*odds* è possibile calcolare il suo logaritmo naturale ovvero il *logit*.

Se confrontiamo la distribuzione delle frequenze, degli odds e dei logit possiamo notare come tutte queste statistiche forniscono la stessa informazione sebbene con valori matematicamente differenti. Quando le categorie " $Y = 1$ " e " $Y = 0$ " sono equiprobabili, le frequenze per entrambe le categorie di  $Y$  sono uguali a 0.5, gli odds sono uguali ad 1, mentre i logit sono uguali a 0. Quando il numero di eventi nella categoria " $Y = 1$ " è maggiore del numero di eventi della categoria " $Y = 0$ " le frequenze relative assumono valori superiori a 0.5 per la categoria " $Y = 1$ " e minori di 0.5 per la categoria " $Y = 0$ ", gli odds assumono valori superiori ad 1, mentre i logit valori superiori allo 0. Infine, quando il numero di eventi nella categoria " $Y = 1$ " è inferiore al numero di di eventi della categoria " $Y = 0$ " le frequenze relative assumono valori inferiori a 0.5 per la categoria " $Y = 1$ " e superiori per la categoria " $Y = 0$ ", gli odds assumono valori inferiori ad 1, mentre i logit valori negativi.

Detto ciò per esprimere la relazione tra la variabile indipendente e la variabile dipendente in termini lineari possiamo partire dalla seguente formulazione in cui il valore atteso della variabile dipendente è : " $Y = \mu_y = P_{(Y=1)}$ ", per cui la probabilità di avere " $Y = 1$ " come funzione lineare di  $X$  diventa:

$$P(Y = 1) = \alpha + \beta X \quad [4]$$

Come detto precedentemente, questo modello non è adeguato, dal momento che i valori della probabilità sono compresi tra 0 e 1, mentre il termine  $\alpha + \beta X$  può assumere valori che vanno da  $-\infty$  a  $+\infty$ . Allora, per provare a risolvere il problema possiamo applicare la trasformazione esponenziale al termine di destra della funzione che diventa:

$$P(Y = 1) = e^{\alpha + \beta X} \quad [5]$$

Anche questa trasformazione, nonostante consenta di restringere i valori dell'equazione entro il range da 0 a  $+\infty$ , non risolve completamente il problema. A tal scopo possiamo applicare la trasformazione logistica che consente di controllare i valori e restringerli nel range della probabilità (0, 1):

$$P(Y = 1) = \frac{e^{\alpha + \beta X}}{1 + e^{\alpha + \beta X}} \quad [6]$$

Nel caso di variabili dicotomiche l'*odds* diventa:

$$odds(Y = 1) = \frac{P(Y=1)}{1-P(Y=1)} \quad [7]$$

Dove:  $P(Y = 0) = [1 - P(Y = 1)]$  serve a esprimere la probabilità della seconda categoria in funzione della prima.

Se definiamo in questo modo la probabilità di “ $Y = 0$ ” possiamo calcolare l'*odds* di “ $Y = 1$ ” che diventa:

$$odds_{Y=1} = \frac{\frac{e^{(\alpha + \beta X)}}{1 + e^{(\alpha + \beta X)}}}{\frac{1}{1 + e^{(\alpha + \beta X)}}} = e^{(\alpha + \beta X)} \quad [8]$$

Infine, per le proprietà dei logaritmi “ $\ln(e^x) = x$ ”, se calcoliamo il logaritmo dell'*odds* osserviamo che il *logaritmo naturale* ( $\ln$ ) dell'*odds* di “ $Y = 1$ ” è funzione lineare della variabile  $X$ :

$$\ln(odds_{Y=1}) = \alpha + \beta X \quad [9]$$

Applicando queste trasformazioni, l'equazione della retta nel caso multivariato diviene:

$$P(Y = 1) = \frac{e^{(\alpha + X_1\beta_1 + X_2\beta_2 + \dots + X_i\beta_i + \epsilon)}}{1 + e^{(\alpha + X_1\beta_1 + X_2\beta_2 + \dots + X_i\beta_i + \epsilon)}} \quad [10]$$

È importante sottolineare che la *probabilità*, l'*odds* e il *logit* sono tre differenti modi di esprimere esattamente la stessa cosa. La trasformazione in *logit* serve solo a garantire la correttezza matematica dell'analisi.



## Capitolo 9

# Applicazione del Modello di Regressione Logistica

La Regressione Logistica è il metodo statistico adottato in questo lavoro. Tale modello appartiene alla famiglia dei modelli lineari generalizzati (GLM - Generalized Linear Model) [71] e, per applicazioni con dati a scala regionale, presenta rispetto ad altri metodi i seguenti vantaggi:

1. può gestire come regressori (variabili indipendenti) un mix di variabili continue (pendenza, ecc.) e categoriche (litologia, uso del suolo, ecc.);
2. è particolarmente indicato per la calibrazione con variabili dipendenti (output) binarie, nel nostro caso “*frana - non frana*” ;
3. restituisce i dati in forma di indicatore compreso tra 0 e 1;
4. può considerare facilmente l’interazione fra diversi regressori.

### 9.1 Le Unità di Condizioni Uniche (UCU)

Una delle fasi principali (e sicuramente più importanti di questo lavoro) è stata la scelta delle Unità di Condizioni Uniche (UCU) intesa come una nuova classificazione dei fattori predisponenti in un numero limitato di classi. Per ciascun fattore predisponente si è ottenuta una carta tematica o layer. Tramite tecniche di analisi spaziale e di algebra di mappa,

disponibili all'interno di un qualsiasi ambiente GIS, si è proceduto alla sovrapposizione dei diversi layers e quindi alla definizione dei domini omogenei (UCU), caratterizzati da combinazioni uniche delle classi in cui i fattori sono stati suddivisi. Il numero e la dimensione delle unità ricavabili dipende essenzialmente dal criterio utilizzato nella riduzione in classi dei diversi fattori.

Nella tabella di figura 9.1, relativa all'area del bacino Gela-Platani-Salvo, è presente uno stralcio di Unique Conditions Units in cui si nota che la classe 4 con 87516 pixel, in cui ricadono 551 punti in frana, è quella che presenta combinazione 2 (>5°) per la Pendenza, 2 (complesso arenaceo-argilloso) per la Litologia, 2 (zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea) per l'Uso del Suolo, 99 per il Curve Number e 60 (0.51-0.60) per l'Indice di Anomalia Pluviometrica.

UCU	CLASSE PENDENZA	LITOLOGIA	USO DEL SUOLO	CN	IA	PIXEL COUNT	AREA (km2)	NUMBER OF POINTS
1	1	1	1	1	1	2000	0.80	1
2	1	1	1	2	1	471	0.19	1
3	1	1	1	3	1	1005	0.41	1
4	2	2	2	99	60	87516	35.01	551
5	1	1	1	4	1	2000	0.80	1
6	1	1	1	5	1	2000	0.80	1
7	1	1	1	6	1	2000	0.80	1
8	1	1	1	7	1	2000	0.80	1
9	1	1	1	8	1	2000	0.80	1
10	1	1	1	9	1	2000	0.80	1
11	1	1	1	10	1	2000	0.80	1
12	1	1	1	11	1	2000	0.80	1
13	1	1	1	12	1	2000	0.80	1
14	1	1	1	13	1	2000	0.80	1
15	1	1	1	14	1	2000	0.80	1
16	1	1	1	15	1	2000	0.80	1
17	1	1	1	16	1	2000	0.80	1
18	1	1	1	17	1	2000	0.80	1
19	1	1	1	18	1	2000	0.80	1
20	1	1	1	19	1	2000	0.80	1
21	1	1	1	20	1	2000	0.80	1
22	1	1	1	21	1	2000	0.80	1
23	1	1	1	22	1	2000	0.80	1
24	1	1	1	23	1	2000	0.80	1
25	1	1	1	24	1	2000	0.80	1
26	1	1	1	25	1	2000	0.80	1
27	1	1	1	26	1	2000	0.80	1
28	1	1	1	27	1	2000	0.80	1
29	1	1	1	28	1	2000	0.80	1
30	1	1	1	29	1	2000	0.80	1
31	1	1	1	30	1	2000	0.80	1
32	1	1	1	31	1	2000	0.80	1
33	1	1	1	32	1	2000	0.80	1
34	1	1	1	33	1	2000	0.80	1
35	1	1	1	34	1	2000	0.80	1
36	1	1	1	35	1	2000	0.80	1
37	1	1	1	36	1	2000	0.80	1
38	1	1	1	37	1	2000	0.80	1
39	1	1	1	38	1	2000	0.80	1
40	1	1	1	39	1	2000	0.80	1
41	1	1	1	40	1	2000	0.80	1
42	1	1	1	41	1	2000	0.80	1
43	1	1	1	42	1	2000	0.80	1
44	1	1	1	43	1	2000	0.80	1
45	1	1	1	44	1	2000	0.80	1
46	1	1	1	45	1	2000	0.80	1
47	1	1	1	46	1	2000	0.80	1
48	1	1	1	47	1	2000	0.80	1
49	1	1	1	48	1	2000	0.80	1
50	1	1	1	49	1	2000	0.80	1
51	1	1	1	50	1	2000	0.80	1
52	1	1	1	51	1	2000	0.80	1
53	1	1	1	52	1	2000	0.80	1
54	1	1	1	53	1	2000	0.80	1
55	1	1	1	54	1	2000	0.80	1
56	1	1	1	55	1	2000	0.80	1
57	1	1	1	56	1	2000	0.80	1
58	1	1	1	57	1	2000	0.80	1
59	1	1	1	58	1	2000	0.80	1
60	1	1	1	59	1	2000	0.80	1
61	1	1	1	60	1	2000	0.80	1
62	1	1	1	61	1	2000	0.80	1
63	1	1	1	62	1	2000	0.80	1
64	1	1	1	63	1	2000	0.80	1
65	1	1	1	64	1	2000	0.80	1
66	1	1	1	65	1	2000	0.80	1
67	1	1	1	66	1	2000	0.80	1
68	1	1	1	67	1	2000	0.80	1
69	1	1	1	68	1	2000	0.80	1
70	1	1	1	69	1	2000	0.80	1
71	1	1	1	70	1	2000	0.80	1
72	1	1	1	71	1	2000	0.80	1
73	1	1	1	72	1	2000	0.80	1
74	1	1	1	73	1	2000	0.80	1
75	1	1	1	74	1	2000	0.80	1
76	1	1	1	75	1	2000	0.80	1
77	1	1	1	76	1	2000	0.80	1
78	1	1	1	77	1	2000	0.80	1
79	1	1	1	78	1	2000	0.80	1
80	1	1	1	79	1	2000	0.80	1
81	1	1	1	80	1	2000	0.80	1
82	1	1	1	81	1	2000	0.80	1
83	1	1	1	82	1	2000	0.80	1
84	1	1	1	83	1	2000	0.80	1
85	1	1	1	84	1	2000	0.80	1
86	1	1	1	85	1	2000	0.80	1
87	1	1	1	86	1	2000	0.80	1
88	1	1	1	87	1	2000	0.80	1
89	1	1	1	88	1	2000	0.80	1
90	1	1	1	89	1	2000	0.80	1
91	1	1	1	90	1	2000	0.80	1
92	1	1	1	91	1	2000	0.80	1
93	1	1	1	92	1	2000	0.80	1
94	1	1	1	93	1	2000	0.80	1
95	1	1	1	94	1	2000	0.80	1
96	1	1	1	95	1	2000	0.80	1
97	1	1	1	96	1	2000	0.80	1
98	1	1	1	97	1	2000	0.80	1
99	1	1	1	98	1	2000	0.80	1
100	1	1	1	99	1	2000	0.80	1

Figura 9.1: Tabella relativa alle UCU (Unique Conditions Units) derivata dalla combinazione dei fattori predisponenti

Quindi per un'area di 5708 km<sup>2</sup> circa circa 50 km<sup>2</sup> si trovano nelle seguenti combi-



nazioni dei fattori predisponenti: complesso litotecnico a comportamento pseudocoerente, pendenza del versante superiore a 5°, un uso del suolo prevalentemente ricoperto da vegetazione arbustiva e erbacea, un valore di Curve Number non significativo (secondo il metodo scelto) ed un valore di Indice di Anomalia Pluviometrica compreso tra 0.51-0.60.

Infine, calcolando l'indice di frana in ciascuna UCU (rapporto percentuale tra l'area in frana in ciascuna UCU e l'area della UCU) è stato possibile effettuare un primo tentativo di valutazione del grado di propensione al dissesto del territorio (probabilità a priori), secondo quanto espresso nell'assunto di Bayes [70]. Infatti dal punto di vista formale, la probabilità a priori è data da:

$$P(f|UCU) = \text{area in frana} / \text{area UCU}$$

dove “ $P(f|UCU)$ ” rappresenta la probabilità “ $P$ ” di frana “ $f$ ” data una certa combinazione dei fattori predisponenti “ $UCU$ ”.

## 9.2 Procedura di calcolo della suscettibilità (ArcSDM-Spatial Data Modeller Extension)

Il software utilizzato per l'analisi di suscettibilità è l'ArcSDM (Arc Spatial Data Modeller [72]) sviluppato come insieme di numerosi strumenti all'interno dell'applicazione ArcTool-Box del software GIS ArcMAP (ESRI) da Don Sawatzky e Gary Raines (USGS - U.S. Geological Survey) e da Graeme Bonham-Carter (GSC - Geological Survey of Canada). Tale applicativo è in grado di effettuare operazioni più o meno complesse sui dati geografici a disposizione nonché di applicare metodi statistici quali il Weights of Evidence, la Regressione Logistica, il Fuzzy Logic e le Reti Neurali.

Gli autori hanno reso disponibile, previa registrazione, il download sia degli eseguibili che del codice sorgente relativo. Il codice scaricato è stato modificato ed integrato tramite la scrittura di uno specifico codice di calcolo in linguaggio Python e C++ così da implementare l'eseguibile finale che nella sua versione originale è in grado di creare al massimo 6000 Unità di Condizioni Uniche (questa limitazione è dovuta ad una limitata dimensione dell'array all'interno dell'eseguibile SDMLR.exe) e quindi impossibilitato a gestire aree di migliaia di chilometri quadri.

L'estensione ArcSDM, partendo dalle probabilità condizionali definite con il metodo di Bayes [73, 74], è stata usata per il calcolo automatico della maggior parte dei parametri necessari per avviare il modello di regressione logistica [75, 76]. Di seguito sono elencati e definiti in maniera dettagliata tali parametri:

- $W_{ij}^+$  (peso positivo): esprime il rapporto tra la probabilità di trovare una  $j$ -esima classe di una  $i$ -esima variabile ( $V$ ) in frana ( $F$ ) e la probabilità di trovarla non in frana ( $F^{\wedge}$ ), situazione opposta per  $W_{ij}^-$  (peso negativo):

$$W_{ij}^+ = \ln \frac{\{V_{ij}|F\}}{\{V_{ij}|F^{\wedge}\}}$$

$$W_{ij}^- = \ln \frac{\{V_{ij}^{\wedge}|F\}}{\{V_{ij}^{\wedge}|F^{\wedge}\}}$$

- Il Contrasto ( $C$ ) definisce il grado di associazione spaziale tra la franosità e ciascuna classe di ogni variabile. È dato dalla differenza tra il peso positivo e quello negativo di ciascuna classe di ogni variabile. Un contrasto uguale a zero indica che la classe del

fattore considerato non è significativa per l'analisi che si sta compiendo. Un contrasto positivo indica una correlazione spaziale positiva, viceversa per un contrasto negativo.

$$C = W^+ - W^-$$

- La Standard Deviation del peso positivo ( $S_{W^+}$ ) e del peso negativo ( $S_{W^-}$ ):

$$S_{W^+} = \sqrt{W^+}$$

$$S_{W^-} = \sqrt{W^-}$$

- La Standard Deviation del Contrasto ( $S_C$ ):

$$S_c = \sqrt{S_{W^+} + S_{W^-}}$$

- Lo Studentized Contrast (*StudC*) rappresenta una misura di significato del contrasto legato all'incertezza nell'assegnazione dei pesi, e viene espresso come il rapporto tra il Contrasto e la sua Standard Deviation [77]. In questo lavoro è stato usato come valore soglia un valore pari a 2 che è risultato essere corrispondente ad un livello di confidenza di circa l'80% [78]:

$$StudC = \frac{C}{S_c}$$

- La Generalize Class (GEN\_CLASS) viene utilizzata per riclassificare ogni singola classe di ogni singolo fattore predisponente la franosità (variabile indipendente) in funzione dello Studentized Contrast. Se quest'ultimo presenta un valore (in valore assoluto) pari o superiore al valore soglia assegnato (nel nostro caso il valore 2), se la variabile è quantitativa (tab. 9.1b) viene assegnato il valore 2 se invece risulta inferiore viene assegnato il valore 1. Di contro se la variabile è qualitativa (tab. 9.1a) viene assegnato il valore corrispondente alla classe presente nella colonna CODE se questo è maggiore del valore soglia, se invece il valore è minore viene assegnato il valore di 99. Avremo tutti i fattori predisponenti riclassificati secondo tale metodo.

Nel presente studio sono state utilizzate 41 variabili indipendenti di *input* (fig. 9.2), ridotte in 38 in seguito alla riclassificazione definita nel punto precedente e rappresentative dei fattori predisponenti, mentre il dato relativo alla variabile dipendente è rappresentato per

ogni fattore predisponente da quella porzione di di area sottesa a un set di punti, distanziati l'uno dall'altro di 20 metri, rappresentanti l'area di distacco della frana.

Parametri Predisponenti	Classi Utilizzate
Pendenza	0 - 5° 5 - 12° 12 - 18° 18 - 32° ≥ 32°
Litologia	Complesso riolitico di deposizione continentale Complesso filadico-metamorfico Complesso sabbioso-calcareo Complesso evaporitico Complesso conglomeratico-arenaceo Complesso argilloso Complesso arenaceo-argilloso Complesso carbonatico Complesso vulcanici
Uso del Suolo	acque continentali acque marine esumbrati prati stabili colture permanenti zone urbanizzate zone industriali, commerciali e reti di comunicazione zone estrattive, discariche e rifiuti zone verdi artificiali zone agricole eterogenee zone boschive zone con vegetazione arbustiva e/o erbacea zone con vegetazione rada o assente zone umide interne zone umide marine
Curve Number (CN)	0 - 10 10 - 37 37 - 51 51 - 60 60 - 68 68 - 78 78 - 81 81 - 86 86 - 98
Indice di Anomalia Fluviometrica (IA)	0 - 0.42 0.42 - 0.52 0.52 - 0.8

Figura 9.2: Tabella dei Parametri predisponenti utilizzati e loro classificazione

La metodologia adottata ha seguito le seguenti fasi:

- suddivisione dell'area di studio in sei macroaree così da ridurre il carico computazionale del modello;
- scelta delle tipologie di frana (nel nostro caso fenomeni a cinematica lenta);
- estrazione tramite software dedicato delle aree instabili (paragrafo 5.4) e conversione in punti a passo 20 metri;

- divisione del dataset delle frane in due dataset distinti, uno di addestramento (*training set*) e un altro di validazione (*validation set*);
- assegnazione, per ogni fattore predisponente, del peso e del contrasto di ogni singola classe al fine di valutare l'effettiva influenza delle stesse al verificarsi del fenomeno;
- riclassificazione dei layers di ogni fattore predisponente in funzione del peso e del contrasto assegnato;
- costruzione delle UCU (Unique Conditions Units) tramite operazioni di overlay in ambiente GIS;
- calcolo dei coefficienti di regressione per ogni singola classe di ogni fattore predisponente e calcolo della probabilità a posteriori tramite il modello di *Regressione Logistica*;
- riclassificazione dei risultati ottenuti dal modello in classi di suscettibilità sulla base di criteri di soglia;
- validazione del modello tramite i dataset di training e di validation.

Ai fini della valutazione della suscettibilità da frana, l'area è stata suddivisa in sei Macroaree (fig. 9.3), usando la classificazione in sei zone di allerta voluta dal Dipartimento di Protezione Civile:

1. Bacino di Gela-Platani-Salso (5708.88  $km^2$ )
2. Val di Mazara (5375.84  $km^2$ )
3. Versante Tirrenico (2847.72  $km^2$ )
4. Bacino del Simeto (4305.80  $km^2$ )
5. Monti Peloritani (2937.80  $km^2$ )
6. Val di Noto (4252.04  $km^2$ )



**Figura 9.3:** Macroaree di Allerta (DPC)

Ogni area di distacco di ogni singolo poligono di frana è stata rasterizzata considerando pixel di 20x20 metri. Successivamente i dati estrapolati sono stati divisi in due differenti banche dati: dati di addestramento (*training set*) e dati di validazione (*validation set*).

I training set sono stati usati per *addestrare* il modello, o meglio per stimare i parametri utilizzati dal modello; mentre i validation set sono stati utilizzati per valutare le *performance* del modello su dati che non sono entrati nella procedura di addestramento e che hanno fornito, per così dire, un terreno di prova. I due dataset sono stati scelti secondo la modalità random, dei 347669 pixel 241602 (70%) sono stati utilizzati per i training set e 106067 (30%) per i validation set. La fase di addestramento è stata eseguita su un sottoinsieme di dati (training set) corrispondenti ad una frazione significativa dell'intero archivio di frane e scelti in modo mirato a seconda della macroarea analizzata.

Le macroaree utilizzate sono evidenziate di seguito:

1. Bacino di Gela-Platani-Salso: 48170 pixel per il training set e 15664 pixel per il validation set;
2. Val di Mazara: 39260 pixel per il training set e 18900 pixel per il validation set;
3. Versante Tirrenico: 67999 pixel per il training set e 30801 pixel per il validation set;

4. Bacino del Simeto: 38649 pixel per il training set e 18660 pixel per il validation set;
5. Monti Peloritani: 44325 pixel per il training set e 16747 pixel per il validation set;
6. Val di Noto: 3199 pixel per il training set e 5295 pixel per il validation set;

Come già accennato, gli input del modello sono costituiti dalle variabili ritenute idonee a descrivere la suscettibilità del territorio alla franosità, mentre un indice probabilistico di franosità è stato scelto come variabile di output. I parametri utilizzati nell'analisi sono rappresentati dalle classi in cui sono stati suddivisi i parametri scelti per la valutazione del rischio da frana [5, 26]. Abbiamo così: 5 variabili per la pendenza, 9 per la litologia, 15 per l'uso del suolo, 9 per il Curve Number e 3 per l'indice di Anomalia Pluviometrica (fig. 9.2). Nell'analisi sono state considerate variabili sia quantitative che qualitative.

Una volta divisi i dataset delle variabili dipendenti sono stati calcolati, tramite il training set, il peso, il contrasto e lo Studentized Contrast, relativi ad ogni singola classe di ogni singolo fattore predisponente [79]. Nella Tabella 9.1 è visibile un esempio di tabelle tipo recanti le relazioni esistenti tra i fattori predisponenti e la franosità, sia per le variabili qualitative (tab. 9.1a) che per quelle quantitative (tab. 9.1b).

Come abbiamo già detto un peso positivo ( $W_{ij}^+$ ) ed un Contrasto positivo ( $C$ ) indicano una correlazione spaziale positiva tra le variabili indipendenti e la variabile dipendente. Nelle tabelle visibili nelle figure 9.4, 9.5, 9.6, 9.7, 9.8, 9.9 sono riportati i valori maggiori di  $W_{ij}^+$  e  $C$  di ogni classe di ogni singolo fattore predisponente per ogni singola macroarea.





CLASS	CODE	AREA SQKM	AREA PIXEL UNITS	NUMBER POINTS	WPLUS	S_WPLUS	WMINUS	S_WMINUS	CONTRAST	S_CONTRAST	STUD_CNT	GEN_CLASS
Seminaivi	1	3148	7870594	20110	-0.2513	0.0071	0.1999	0.0056	-0.4512	0.0090	-49.9801	1
Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	2	1151	2877890	10312	0.0879	0.0099	-0.0207	0.0049	0.1085	0.0110	9.8464	2
Zone boscate	3	536	889533	1756	-0.5099	0.0239	0.0236	0.0045	-0.5335	0.0243	-21.9526	3
Zone aperte con vegetazione rada o assente	4	84	209030	527	-0.2647	0.0436	0.0031	0.0044	-0.2679	0.0438	-6.1100	4
Colture permanenti	5	781	1952750	8620	0.2973	0.0108	-0.0500	0.0048	0.3473	0.0118	29.3808	5
Zone urbanizzate	6	126	315380	4462	1.4718	0.0151	-0.0701	0.0046	1.5419	0.0158	97.8109	6
Zone industriali, commerciali e reti di comunicazione	7	14	35066	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	99
Zone verdi artificiali non agricole	8	2	4636	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	99

**(a) Variabile Qualitativa (Uso del Suolo)**

Nella colonna STUD\_CNT in rosso sono espressi i valori di *Studentized Contrast* maggiori di 2 in valore assoluto mentre in blu i valori minori di 2. Nella colonna GEN\_CLASS i valori uguali ai valori della colonna CODE (in rosso) vengono assegnati a quelle classi con *StudC* maggiore di 2 mentre il valore 99 (in blu) viene assegnato a quelle classi con *StudC* minore di 2.

CLASS	CODE	AREA SQKM	AREA PIXEL UNITS	NUMBER POINTS	WPLUS	S_WPLUS	WMINUS	S_WMINUS	CONTRAST	S_CONTRAST	STUD_CNT	GEN_CLASS
>32°	5	193	482518	2357	0.4372	0.0206	-0.0167	0.0045	0.4540	0.0211	21.4804	2
18-32°	4	953	2381941	11975	0.4661	0.0092	-0.1061	0.0050	0.5723	0.0104	54.7897	2
12-18°	3	2570	6424588	30741	0.4165	0.0057	-0.4032	0.0069	0.8196	0.0090	91.5185	2
5-12°	2	4499	11248173	48121	0.3040	0.0046	-1.4823	0.0164	1.7863	0.0171	104.7438	2
0-5°	1	6560	16400246	51828	0.0000	0.0044	5.7540	14.1421	-5.7540	14.1421	-0.4069	1

**(b) Variabile Quantitativa (Pendenza)**

Nella colonna STUD\_CNT in rosso sono espressi i valori di *Studentized Contrast* maggiori di 2 in valore assoluto mentre in blu i valori minori di 2. Nella colonna GEN\_CLASS il valore 2 (in rosso) viene assegnato a quelle classi con *StudC* maggiore di 2 mentre il valore 1 (in blu) viene assegnato a quelle classi con *StudC* minore di 2.

**Tabella 9.1: Stralcio di tabelle recanti le relazioni esistenti tra fattori predisponenti e franosità**

CAPITOLO 9. Applicazione del Modello di Regressione Logistica

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
> 32	1	0.2818	-0.0099	0.2918
18 - 32	2	0.3973	-0.0854	0.4827
12 - 18	3	0.4016	-0.3620	0.7635
5 - 12	4	0.3033	-1.4908	1.7846
0 - 5	5	0.0000	5.7854	5.7854

(a) Pendenza

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
Complesso carbonatico	1	-1.5734	0.0253	-1.5581
Complesso arenaceo-argilloso	2	-0.5655	0.0102	-0.5757
Complesso clastico di deposizione continentale	3	-1.2345	0.0937	-1.3282
Complesso argilloso	4	0.0504	-0.0621	0.1125
Complesso conglomeratico-arenaceo	5	-0.4065	0.0094	-0.4158
Complesso evaporitico	6	0.7510	-0.2128	0.9638
Complesso sabbioso-calcareo	7	-0.7897	0.0666	-0.8564

(b) Litologia

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
Summita	1	-0.2385	0.1903	-0.4288
Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	2	0.0927	-0.0219	0.1146
Zone boscate	3	-0.7483	0.0310	-0.7793
Zone aperte con vegetazione radi e assente	4	-0.2323	0.0028	-0.2351
Culture permanenti	5	0.2955	-0.0497	0.3452
Zone agricole eterogenee	6	0.1560	-0.0189	0.1749
Zone urbanizzate	7	-1.4651	-0.0695	-1.5346
Zone estrattive, discariche e cantieri	8	-0.7374	0.0010	-0.7385
Zone industriali, commerciali e reti di comunicazione	9	0.0000	0.0000	0.0000
Acque continentali	10	0.0000	0.0000	0.0000
Zone verdi artificiali (non agricole)	11	0.0000	0.0000	0.0000
Zone umide interne	12	0.0000	0.0000	0.0000

(c) Uso del Suolo

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
0 - 10	1	0.0000	0.0000	0.0000
10 - 37	2	0.0000	0.0000	0.0000
37 - 51	3	-0.6625	0.0005	-0.6630
51 - 60	4	-0.6725	0.0094	-0.6820
60 - 68	5	-0.6519	0.0260	-0.5779
68 - 76	6	0.0617	-0.0096	0.0712
76 - 81	7	-0.0020	0.0007	-0.0027
81 - 88	8	-0.0197	0.0151	-0.0348
88 - 98	9	0.8025	-0.0872	0.8897

(d) Curve Number

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
0.00 - 0.35	1	-0.4561	0.0128	-0.4688
0.35 - 0.51	2	0.0303	-0.2946	0.3249
0.51 - 0.60	3	-0.2283	0.0161	-0.2444

(e) Indice Anomalia Pluviometrica

Figura 9.4: Valori di  $W^+$ ,  $W^-$  e  $C$  dei fattori predisponenti nella macroarea del Bacino Gela-Platani-Salso (in giallo i valori di *Contrasto* più alti)

CAPITOLO 9. Applicazione del Modello di Regressione Logistica

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
> 32	1	0.6680	0.0245	0.6826
18 - 32	2	0.4595	-0.0577	0.5172
12 - 18	3	0.6993	-0.4180	1.1173
5 - 12	4	0.6271	-2.7560	3.3831
0 - 5	5	0.0000	-5.9744	-5.9744

(a) Pendenza

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
Complesso classico di deposizione continentale	1	-0.9967	0.1029	-1.0997
Complesso sabbioso-calcareo	3	-1.6482	0.1667	-1.8149
Complesso evaporifico	4	-0.1902	0.0091	-0.1994
Complesso conglomeratico argilloso	5	0.0025	-0.0001	0.0027
Complesso argilloso	6	0.4070	-0.3160	0.7230
Complesso arenaceo-argilloso	7	0.0000	0.0000	0.0000
Complesso carbonaceo	8	0.3996	-0.1256	0.5252
Complesso vulcanico	9	0.8654	-0.0004	0.8658

(b) Litologia

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
Zone aperte con vegetazione rada o assente	1	-0.0162	0.0001	-0.0164
Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	2	0.2320	-0.0427	0.2747
Zone urbanizzate	3	0.2895	-0.0212	0.3107
Zone boscate	4	-0.3047	0.0124	-0.3171
Zone industriali, commerciali e reti di comunicazione	5	0.0000	0.0000	0.0000
Zone estrattive, discariche e cantieri	6	1.0057	-0.0134	1.0591
Culture permanenti	7	-0.1983	0.0987	-0.2970
Seminativi	8	0.1394	-0.0556	0.1951
Zone verdi artificiali non agricole	9	0.0000	0.0000	0.0000
Zone agricole eterogenee	10	-0.2261	0.0222	-0.2482
Acque continentali	11	0.0000	0.0000	0.0000
Zone umide marittime	12	0.0000	0.0000	0.0000
Zone umide interne	13	0.0000	0.0000	0.0000

(c) Uso del Suolo

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
0 - 10	1	-5.5382	0.1091	-5.6473
10 - 37	2	-5.3906	0.0056	-5.3961
37 - 51	3	-0.9614	0.0068	-0.9682
51 - 60	4	-1.2545	0.0123	-1.2668
60 - 68	5	-0.0912	0.0051	-0.0967
68 - 76	6	-0.1187	0.0156	-0.1342
76 - 81	7	-0.1214	0.0650	-0.1864
81 - 88	8	0.3825	-0.1300	0.5125
88 - 90	9	0.6728	-0.1079	0.7806

(d) Curve Number

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
0.00 - 0.35	1	-0.2984	0.0462	-0.3446
0.35 - 0.51	2	-0.0519	0.1882	-0.2401
0.51 - 0.60	3	1.0813	-0.0878	1.1691

(e) Indice anomalia Pluviometrica

Figura 9.5: Valori di  $W^+$ ,  $W^-$  e  $C$  dei fattori predisponenti nella macroarea di Val di Mazara (in giallo i valori di *Contrasto* più alti)

CAPITOLO 9. Applicazione del Modello di Regressione Logistica

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
> 32	1	-0.6113	0.0160	-0.6273
18 - 32	2	-0.1103	0.0241	-0.1344
12 - 18	3	0.1617	-0.1830	0.3447
5 - 12	4	0.1485	-2.1705	2.3194
0 - 5	5	0.0000	4.8919	-4.8919

(a) Pendenza

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
Complesso clastico di deposizione continentale	1	-1.4882	0.0435	-1.5317
Complesso filadico e metamorfico	2	0.4999	-0.0036	0.5035
Complesso sabbioso-calcareo	3	-2.3408	0.0514	-2.3923
Complesso evaporitico	4	-2.3788	0.0094	-2.3882
Complesso conglomeratico-arenaceo	5	-0.6343	0.0247	-0.6585
Complesso argilloso	6	0.0342	-0.0171	0.0513
Complesso arenaceo-argilloso	7	0.4051	-0.3389	0.7441
Complesso carbonatico	8	0.8030	0.0007	-0.8037

(b) Litologia

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
Zone urbanizzate	1	0.6795	-0.0176	0.6972
Culture permanenti	2	0.3798	-0.1024	0.4822
Zone boscate	3	-0.7278	0.0855	-0.8130
Acque continentali	4	0.0000	0.0000	0.0000
Zone industriali, commerciali e reti di comunicazione	5	-3.0264	0.0026	-3.0238
Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	6	0.2269	-0.1230	0.3499
Zone estrattive, discariche e cantieri	7	-0.6273	0.0010	-0.6283
Zone agricole eterogenee	8	0.3365	-0.0291	0.3658
Zone aperte con vegetazione rada o assente	9	-1.0745	0.0111	-1.0856
Seminativi	10	-0.5858	0.1370	-0.6928
Zone verdi artificiali non agricole	11	0.0000	0.0000	0.0000

(c) Uso del Suolo

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
0 - 10	1	-4.1476	0.0712	-4.2188
10 - 37	2	0.0000	0.0000	0.0000
37 - 51	3	0.0000	0.0000	0.0000
51 - 60	4	-0.5338	0.0123	-0.5461
60 - 68	5	-0.2128	0.0129	-0.2257
68 - 76	6	-0.8125	0.0889	-0.9014
76 - 81	7	0.2797	-0.1830	0.4627
81 - 88	8	0.1583	-0.0631	0.2414
88 - 98	9	0.2329	0.0095	0.2424

(d) Curve Number

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
0.35 - 0.51	1	-0.0715	0.1648	-0.2364
0.51 - 0.60	2	0.1648	0.0715	0.2364

(e) Indice Anomalia Pluviometrica

Figura 9.6: Valori di  $W^+$ ,  $W^-$  e  $C$  dei fattori predisponenti nella macroarea del Versante Tirrenico (in giallo i valori di *Contrasto* più alti)



CAPITOLO 9. Applicazione del Modello di Regressione Logistica

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
> 32	1	0.4467	0.0181	0.4648
18 - 32	2	0.5460	-0.1612	0.7072
12 - 18	3	0.6129	-0.7219	1.3349
5 - 12	4	0.7947	-2.3652	2.7599
0 - 5	5	0.0000	-5.7633	-5.7633

(a) Pendenza

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
Complesso clastico di deposizione continentale	1	-1.6188	0.1610	-1.7798
Complesso filadico e metaurifico	2	0.0000	0.0000	-0.0000
Complesso sabbioso-calcareitico	3	-1.5284	0.0833	-1.6117
Complesso evaporitico	4	1.1948	-0.0643	1.2591
Complesso conglomeratico-arenaceo	5	0.0000	0.0000	0.0000
Complesso argilloso	6	0.2082	-0.2121	0.4204
Complesso arenaceo-argilloso	7	1.8661	-0.2286	1.2567
Complesso carbonatico	8	0.0855	-0.6003	0.0855
Complesso vulcanico	9	-2.3203	0.1390	-2.4593

(b) Litologia

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
Zone boscate	1	-0.3213	0.0239	-0.3451
Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	2	0.4486	-0.2046	0.6531
Zone aperte con vegetazione rada e assente	3	-0.7778	0.0144	-0.7922
Seminativi	4	-0.0450	0.0269	-0.0719
Acque continentali	5	0.0000	0.0000	0.0000
Zone agricole eterogenee	6	0.1427	-0.0099	0.1526
Zone urbanizzate	7	0.4055	-0.0127	0.4182
Culture permanenti	8	-0.8592	0.1080	-0.9672
Zone industriali, commerciali e reti di comunicazione	9	-2.5659	0.0869	-2.5728
Zone estrattive, discariche e cantieri	10	-0.5750	0.0008	-0.5758
Zone verdi artificiali non agricole	11	0.0000	0.0000	0.0000

(c) Uso del Suolo

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
0 - 10	1	0.0000	0.0000	0.0000
10 - 37	2	-3.6593	0.0231	-3.6824
37 - 51	3	0.0000	0.0000	0.0000
51 - 60	4	-1.6385	0.0519	-1.6904
60 - 68	5	0.1639	-0.0127	0.1666
68 - 76	6	0.2107	-0.0300	0.2407
76 - 81	7	0.5095	-0.1271	0.6366
81 - 88	8	-0.0180	0.0140	-0.0320
88 - 98	9	-0.3994	0.0434	-0.4428

(d) Curve Number

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
0.35 - 0.51	1	-0.1337	-1.2781	1.4119
0.51 - 0.60	2	-1.2781	0.1337	-1.4119

(e) Indice Anomalia Pluviometrica

Figura 9.7: Valori di  $W^+$ ,  $W^-$  e  $C$  dei fattori predisponenti nella macroarea del Bacino del Simeto (in giallo i valori di *Contrasto* più alti)

CAPITOLO 9. Applicazione del Modello di Regressione Logistica

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
> 32	1	0.2070	0.0140	0.2210
18 - 32	2	0.3303	-0.1068	0.4371
12 - 18	3	0.4917	-0.6373	1.1290
5 - 12	4	0.3237	-2.6771	3.0000
0 - 5	5	0.0000	5.3028	-5.3028

(a) Pendenza

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
Complesso clastico di deposizione continentale	1	-2.0664	0.0823	-2.1487
Complesso filadico e metamorfico	2	0.4238	-0.2707	0.6544
Complesso sabbioso-calcareo	3	-0.0078	0.0002	-0.0080
Complesso evaporitico	4	0.3255	-0.0020	0.3275
Complesso conglomeratico-arenaceo	5	0.4837	-0.0208	0.5045
Complesso argilloso	6	0.4247	-0.0290	0.4537
Complesso arenaceo-argilloso	7	0.3460	-0.1256	0.4716
Complesso carbonatico	8	0.4180	-0.0258	0.4437
Complesso vulcanico	9	-3.4860	0.2701	-3.7561

(b) Litologia

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	1	0.0269	-0.0132	0.0401
Zone urbanizzate	2	-0.1904	0.0167	-0.2071
Culture permanenti	3	0.4113	-0.1822	0.6735
Zone agricole eterogenee	4	-0.1152	0.0126	-0.1308
Seminate	5	-1.1034	0.0167	-1.1201
Acque marittime	6	0.0000	0.0000	0.0000
Acque continentali	7	-1.6955	0.0072	-1.7027
Zone estrattive, discariche e cantieri	8	-0.8742	0.0010	-0.8752
Zone boscate	9	-0.2944	0.0531	-0.3475
Zone industriali, commerciali e reti di comunicazione	10	-1.8977	0.0066	-1.9042
Zone sportive con vegetazione rada o assente	11	-0.8277	0.0218	-0.8495
Zone verdi artificiali non agricole	12	0.0000	0.0000	0.0000

(c) Uso del Suolo

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
0 - 10	1	-7.8537	0.1382	-7.6919
10 - 37	2	0.0000	0.0000	0.0000
37 - 51	3	-1.4270	0.0046	-1.4318
51 - 60	4	-0.4747	0.0732	-0.5478
60 - 68	5	-0.1760	0.0235	-0.2003
68 - 76	6	0.5629	-0.1236	0.7065
76 - 81	7	0.6879	-0.2694	0.9573
81 - 88	8	0.0154	-0.0015	0.0169
88 - 98	9	-0.3489	0.0403	-0.3892

(d) Curve Number

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
0.00 - 0.35	1	-1.8376	0.0158	-1.8534
0.35 - 0.51	2	0.1147	-0.1701	0.2848
0.51 - 0.60	3	-0.1348	0.0869	-0.2216

(e) Indice di Anomalia Pluviometrica

Figura 9.8: Valori di  $W^+$ ,  $W^-$  e  $C$  dei fattori predisponenti nella macroarea dei Monti Peloritani (in giallo i valori di *Contrasto* più alti)

CAPITOLO 9. Applicazione del Modello di Regressione Logistica

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
> 32	1	1.1248	0.0524	1.1772
18 - 32	2	1.5407	-0.6233	2.0641
12 - 18	3	1.2459	-1.5110	2.7569
5 - 12	4	0.6218	-2.8330	3.4548
0 - 5	5	0.0000	0.2606	0.2606

(a) Pendenza

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
Complesso clastico di deposizione continentale	1	0.0000	0.0000	0.0000
Complesso sabbioso-calcareo	3	-1.0806	0.1890	-1.2696
Complesso evaporitico	4	0.0000	0.0000	0.0000
Complesso conglomeratico-arenaceo	5	0.0000	0.0000	0.0000
Complesso argilloso	6	1.2720	-0.6019	1.8739
Complesso carbonatico	8	0.7271	0.2828	1.0098
Complesso vulcanico	9	0.5716	-0.1016	0.6732

(b) Litologia

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
Summita	1	-0.0620	0.0290	-0.0910
Colture permanenti	2	-3.0775	0.2347	-3.3122
Zone boscate	3	-0.0395	0.0617	-0.0412
Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	4	0.7911	-0.3959	1.1870
Zone estrattive, discariche e cantieri	5	0.0000	0.0000	0.0000
Zone urbanizzate	6	0.6462	-0.0332	0.6794
Zone agricole eterogenee	7	-0.3300	0.0408	-0.3708
Acque continentali	8	0.0000	0.0000	0.0000
Zone aperte con vegetazione rada o assente	9	-0.6973	0.0106	-0.7079
Zone umide marittime	10	0.0000	0.0000	0.0000
Zone industriali, commerciali e reti di comunicazione	11	0.0000	0.0000	0.0000
Zone verdi artificiali non agricole	12	0.0000	0.0000	0.0000

(c) Uso del Suolo

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
0 - 10	1	0.0000	0.0000	0.0000
10 - 37	2	-0.4093	0.0061	-0.4154
37 - 51	3	0.0000	0.0000	0.0000
51 - 60	4	1.0440	-0.1546	1.1985
60 - 68	5	-1.8994	0.1402	-2.0396
68 - 76	6	-0.5294	0.0698	-0.5992
76 - 81	7	-0.0551	0.0248	-0.0800
81 - 88	8	0.8103	-0.2021	1.1124
88 - 98	9	0.2661	0.0260	0.2912

(d) Curve Number

CLASS	CODE	WPLUS	WMINUS	CONTRAST
0.00 - 0.35	1	0.0000	0.0000	0.0000
0.35 - 0.51	2	-0.5452	1.1802	-1.7054
0.51 - 0.60	3	1.4628	-0.5927	2.0455

(e) Indice Anomalia Pluviometrica

Figura 9.9: Valori di  $W^+$ ,  $W^-$  e  $C$  dei fattori predisponenti nella macroarea di Val di Noto (in giallo i valori di *Contrasto* più alti)

Come si evince dalle tabelle precedenti, tranne poche piccole differenze, tutte e sei le macroaree presentano valori di contrasto e di peso positivo simili fra loro. Nello specifico, all'interno della variabile Pendenza le classi con contrasto maggiore risultano essere quelle con angoli di pendenza compresi tra 5-12° e 12-18°, a confermare l'ipotesi secondo la quale la maggior parte degli scivolamenti e dei colamenti lenti sia rappresentata da movimenti di riattivazione. In questo caso il fattore pendenza può rappresentare una valida discriminante.

Per quanto riguarda la variabile Litologia il complesso argilloso è la classe che presenta contrasto più alto in tutte e sei le macroaree, seguita dalla classe arenaceo-argillosa e da quella evaporitica. Un contrasto alto nella classe del complesso evaporitico può essere dovuto alla presenza massiccia, all'interno del complesso, di componenti argillose.

L'Uso del Suolo presenta valori di contrasto significativi nella classe relativa alle zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea, di seguito un contrasto leggermente minore lo troviamo nelle zone urbanizzate ed infine valori ancora più bassi si hanno nelle colture permanenti e nelle zone agricole eterogenee. Un alto valore di contrasto nelle zone urbanizzate, come già detto nel paragrafo 3.2.2, può essere dovuto all'urbanizzazione selvaggia avvenuta negli anni passati in Sicilia e probabilmente anche ad una più attenta fotointerpretazione nelle aree antropiche da parte degli operatori IFFI.

Il Curve Number concentra i valori di contrasto maggiori nelle classi più alte e precisamente nelle classi 81-88 e 88-98 a conferma che la tipologia di frane utilizzate si sviluppa principalmente su terreni argillosi e arenaceo-argillosi.

L'Indice di Anomalia Pluviometrica presenta valori di contrasto significativi nelle classi 0.35-0.51 e 0.51-0.60, cioè in quelle aree dove la classe di rischio, definita in funzione della distribuzione di frequenza del valore medio dell'Indice ( $I_a$ ) all'interno delle aree in frana, presenta valori medio-alti.

Si può inoltre definire il contrasto associato a ciascuna variabile di ciascuna macroarea, ottenuto come differenza tra il contrasto più alto e quello più basso, considerando tutte le classi componenti ogni singolo fattore predisponente. Come si nota nella tabella 9.2, la variabile pendenza presenta il contrasto più alto e quindi una correlazione spaziale maggiore all'innescarsi di fenomeni franosi.



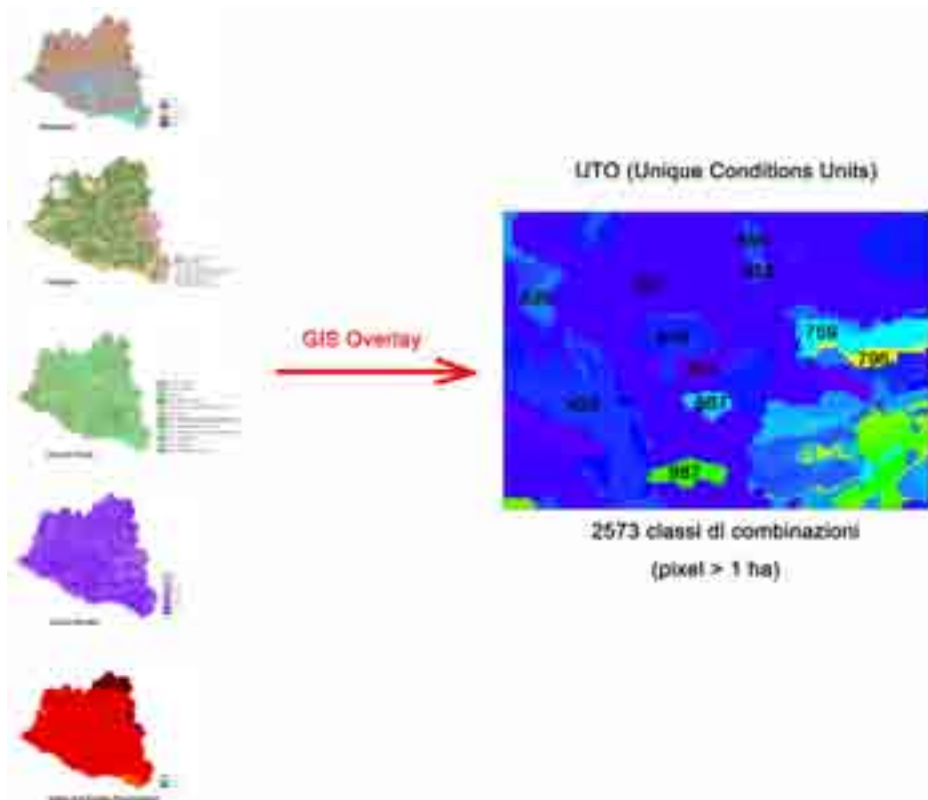
Fattori Predisponenti	Contrasto ( $C$ )
Pendenza	8.78015
Litologia	3.28161
Uso del Suolo	2.94218
Curve Number	4.84806
Indice di Anomalia Pluviometrica	1.91551

**Tabella 9.2:** Differenza tra il *Contrasto* più alto e quello più basso considerando tutte le classi componenti ogni singolo fattore predisponente

Una volta calcolati i pesi  $W^+$  e  $W^-$  e il *Contrasto* ( $C$ ) per ogni singola classe di ogni singolo fattore predisponente, il software ArcSDM riclassifica ogni singolo raster in funzione della colonna GEN\_CLASS creando un nuovo e unico tema attraverso la combinazione, ovvero l'incrocio, dei layers ottenuti dai singoli fattori predisponenti (fig. 9.10), determinando in questo modo le UCU (Unique Condition Units), cioè classi di aree che si trovano sotto le stesse combinazioni di fattori predisponenti. In questo studio, come più volte detto, i layers usati sono quelli descritti precedentemente, cioè: la *Pendenza*, la *Litologia*, l'*Uso del Suolo*, il *Curve Number* e l'*Indice di Anomalia Pluviometrica*.

Le classi di UCU, previste teoricamente, sarebbero 18225 ( $5 \times 9 \times 15 \times 9 \times 3$ ), ma la riclassificazione ottenuta tramite la colonna GEN\_CLASS riduce notevolmente tale numero. Un esempio di riclassificazione relativo alla macroarea 1 (bacino di Gela-Platani-Salso) evidenzia: 2 classi per la *Pendenza*, 7 per la *Litologia*, 9 per l'*Uso del Suolo*, 7 per il *Curve Number* e 3 per l'*Indice di Anomalia Pluviometrica*. Questa operazione individua un numero notevolmente minore di domini spaziali omogenei (2646 classi di combinazioni). Una così alta riduzione di classi di combinazioni è data dalla mancanza o dall'accorpamento di uno o più termini del prodotto, ad esempio dall'assenza del complesso filladico-metamorfico e del complesso vulcanico (quindi la variabile litologica presenterà 7 classi invece di 9) oppure dall'accorpamento nella classe 99 di tutte le classi in cui non ricadono pixel in frana. Un'ulteriore riduzione del numero di UCU si ha nell'accorpamento ai poligoni adiacenti di quelle classi con area inferiore a un ettaro. La definizione dell'area minima è avvenuta sulla base di considerazioni riguardanti la dimensione media delle frane. È probabile che UCU molto piccole siano il risultato di errori avvenuti nel riporto cartografico dei confini dei diversi parametri e che quindi non abbiano alcun significato fisico-descrittivo delle condizioni reali. Al termine di tali procedure il numero finale di UCU per la macroarea 1 è di 712 classi. Dal punto di vista geostatistico, una riclassificazione di questo tipo semplifica e alleggerisce il

calcolo computazionale, senza per questo causare perdita di qualità nel risultato finale dato che si basa sulla statistica bivariata.



**Figura 9.10:** Creazione delle UCU mediante operazioni di *overlay* in ambiente GIS

### 9.2.1 Gli output del modello

Al termine del calcolo di regressione il software ArcSDM memorizza all'interno della directory di lavoro una serie di file, elencati di seguito, che riassumono le varie fasi del processamento:

File Name	Descrizione
case.dat	foglio di calcolo che riassume le UCU
cumfre.tba	riepilogo delle frequenze cumulative di probabilità
LR_Coeff.dbf	riepilogo dei coefficienti di regressione per ogni singolo fattore predisponente e relativa standard deviation
logpol.out	riepilogo della convergenza dei coefficienti di regressione logistica attraverso tutte le iterazioni di calcolo
LR_logpol.dbf	riepilogo dei valori di probabilità a posteriori, di standard deviation e dello student-t value per ciascuna UCU

**Tabella 9.3:** Log file ottenuti dal software ArcSDM

I coefficienti di regressione vengono stimati attraverso la tecnica della Massima Verosimiglianza (Maximum Likelihood). Questa tecnica affronta la casualità in termini inversi rispetto alla probabilità, cioè parte dai dati sperimentali e si chiede che probabilità c'è di avere una distribuzione di un certo tipo. Lavora per approssimazioni successive e stima una matrice di correlazione e un insieme di varianze che rappresentano i dati sperimentali, eliminando la ridondanza con la minima dispersione d'informazione. Aumenta e diminuisce la varianza dei fattori e contemporaneamente modifica anche gli altri fattori finché non trova la combinazione di fattori e varianze che rappresentano al meglio la realtà. La tecnica della Massima Verosimiglianza ci offre la miglior rappresentazione della realtà possibile e ci dà anche la misura di quanto bene riesca a rappresentarla. Nelle pagine seguenti è visibile un estratto di alcune pagine del file denominato logpol.out che riassume tale tecnica.

Operativamente il modello, nella fase di addestramento, utilizza un campione di soggetti di cui conosce l'appartenenza a uno dei gruppi considerati e calcola i parametri necessari alla classificazione di un nuovo soggetto. Di seguito per ogni soggetto il modello calcola la probabilità di appartenenza a ciascun gruppo e la relativa assegnazione del soggetto al gruppo per cui è maggiore la probabilità di appartenenza.

## CAPITOLO 9. Applicazione del Modello di Regressione Logistica

---

File: C:\dati\_sicilia\_uni\temp\_gela\_2\logpol.out 14/10/2010, 14.55.11

---

LEVEL OF CONVERGENCE = 0.0099999998  
MAXIMUM PERMISSIBLE NO. OF ITERATIONS = 30  
NUMBER OF VARIABLES = 22  
NUMBER OF OBSERVATIONS WITH Y(I)=1 = 138  
NUMBER OF OBSERVATIONS WITH Y(I)=0 = 712

INPUT FORMAT = (14f12.6)

ICOEF = 0 ICO = 0

AS A STARTING POINT, ALL COEFFICIENTS ARE SET EQUAL TO ZERO.

1 TH ITERATION

THE INPUT MATRIX HAS RANK 19

SCORES---ITERATION WILL CEASE WHEN ALL SCORES ARE LESS THAN THE GIVEN  
LEVEL OF CONVERGENCE.

-0.2611528E+06 -0.6598998E+04 -0.2347224E+06 -0.1983117E+05 -0.4468217E+06  
-0.1304243E+06 -0.4755048E+05 -0.1470832E+05 -0.3227708E+05 -0.2607261E+05  
-0.5123866E+04 -0.4995934E+04 -0.5108150E+04 -0.1586507E+05 -0.1718372E+05  
-0.2229957E+06 -0.8168566E+04 -0.5973349E+04 -0.3181453E+05 -0.1405519E+06  
-0.7167501E+04 -0.3821647E+05 -0.2926030E+05

1 TH ESTIMATE OF COEFFICIENTS:

-0.2037274E+01 0.8404694E-02 0.4896068E-02 0.0000000E+00 0.1574257E-01  
0.9584160E-02 0.1051152E-01 0.6293436E-02 0.1773035E-01 0.1273825E-01  
0.5938622E-01 0.0000000E+00 -0.7039363E-03 -0.4087151E-02 0.1098404E-01  
0.0000000E+00 -0.4858393E-02 0.2683285E-02 0.2385892E-02 0.9674470E-02  
0.4133156E-02 0.2357358E-01 0.0000000E+00

NUMBER OF SCORES WHICH ARE GREATER THAN SPECIFIED LEVEL OF CONVERGENCE =  
23

2 TH ITERATION

THE INPUT MATRIX HAS RANK 19

SCORES---ITERATION WILL CEASE WHEN ALL SCORES ARE LESS THAN THE GIVEN  
LEVEL OF CONVERGENCE.

---

Pagina: 1

## CAPITOLO 9. Applicazione del Modello di Regressione Logistica

File: C:\dati\_sicilia\_uni\temp\_gela\_2\logpol.out 14/10/2010, 14.55.11

FINAL ESTIMATES OF COEFFICIENTS

-0.1037402E+02	0.7252674E+00	0.3560272E+00	0.0000000E+00	0.1503099E+01
0.6772777E+00	0.7881358E+00	0.3240180E+00	0.1192977E+01	0.9187300E+00
0.2277239E+01	0.0000000E+00	-0.1026059E+00	-0.3392908E+00	0.4919131E+00
0.0000000E+00	-0.8813402E+00	0.3120058E+00	-0.1263863E-01	0.9148029E+00
0.4871465E+00	0.1436792E+01	0.0000000E+00		

VARIANCE-COVARIANCE MATRIX:

0.93849D-01	-0.11141D-01	-0.10107D-01	-0.10000D+01	-0.13969D-01
-0.47164D-01	-0.46613D-01	-0.47340D-01	-0.47493D-01	-0.47090D-01
-0.47434D-01	-0.10000D+01	-0.24518D-02	-0.14283D-02	-0.23728D-02
-0.10000D+01	-0.93603D-02	-0.12608D-01	-0.13720D-01	-0.10477D-01
-0.10591D-01	-0.10030D-01	-0.10000D+01		
-0.11141D-01	0.32478D-01	0.90634D-02	0.10000D+01	0.91187D-03
0.68610D-04	0.57284D-03	0.82651D-03	-0.71828D-03	0.65987D-04
0.16882D-03	-0.27940D-08	-0.15962D-02	-0.15850D-02	-0.64964D-03
-0.37253D-08	0.18195D-03	0.34257D-02	-0.17529D-02	0.49774D-03
0.14962D-02	0.43577D-03	0.15338D-07		
-0.10107D-01	0.90634D-02	0.95565D-02	0.10000D+01	0.31626D-03
0.15793D-03	0.41887D-03	0.28308D-03	-0.30021D-04	0.16296D-03
0.73997D-03	0.27940D-08	0.18974D-03	-0.15435D-03	-0.32045D-03
0.23283D-08	0.14859D-03	0.31135D-02	-0.32706D-04	0.54061D-03
0.10321D-02	-0.11889D-03	0.47730D-08		
0.10000D+01	-0.10000D+01	-0.10000D+01	0.00000D+00	-0.21275D-13
0.52400D-13	0.53125D-13	0.53734D-13	0.51804D-13	0.52051D-13
0.49915D-13	0.11231D-11	0.15088D-14	0.14484D-14	0.17789D-14
0.13500D-12	0.73993D-14	0.87746D-14	0.97612D-15	0.60622D-14
0.73711D-14	0.76079D-14	0.48109D-12		
-0.13969D-01	0.91187D-03	0.31626D-03	0.21057D-13	0.71529D-02
0.25110D-03	-0.93596D-04	-0.94986D-04	0.37618D-03	0.23610D-03
0.56867D-03	-0.33760D-08	-0.18879D-03	-0.18783D-03	0.16887D-03
-0.98953D-09	-0.61482D-03	-0.49291D-03	0.16300D-02	-0.33736D-03
-0.51820D-03	-0.47090D-03	0.18626D-08		
-0.47164D-01	0.68610D-04	0.15793D-03	-0.41644D-13	0.25110D-03
0.47941D-01	0.46413D-01	0.46567D-01	0.46440D-01	0.46350D-01
0.45319D-01	0.10000D+01	0.51662D-03	0.94785D-03	0.19970D-02
-0.60536D-08	-0.29252D-03	-0.32780D-03	-0.13470D-03	-0.50499D-03
-0.66646D-03	0.31445D-03	0.74505D-08		
-0.46613D-01	0.57284D-03	0.41887D-03	-0.42353D-13	-0.93595D-04
0.46413D-01	0.48757D-01	0.46455D-01	0.46271D-01	0.46223D-01
0.45276D-01	0.10000D+01	-0.24182D-05	0.36251D-03	0.17421D-02
0.23282D-09	-0.67977D-03	-0.84603D-03	0.14134D-03	-0.21959D-03
-0.12446D-03	0.10874D-03	-0.16299D-08		
-0.47340D-01	0.82651D-03	0.28308D-03	-0.42784D-13	-0.94986D-04
0.46567D-01	0.46455D-01	0.64887D-01	0.46413D-01	0.46331D-01
0.45215D-01	0.10000D+01	-0.29334D-02	-0.21619D-03	0.20453D-02
-0.74506D-08	-0.13311D-02	-0.46987D-03	0.62358D-03	0.44207D-03
0.92433D-03	0.10907D-02	-0.18627D-08		
-0.47493D-01	-0.71828D-03	-0.30021D-04	-0.41086D-13	0.37618D-03
0.46440D-01	0.46271D-01	0.46413D-01	0.49425D-01	0.46274D-01
0.45261D-01	0.10000D+01	0.49502D-03	0.26511D-03	0.19442D-02
0.94296D-08	0.20474D-03	0.38118D-03	0.54401D-03	0.18297D-03
-0.47432D-04	0.42855D-03	0.58124D-10		
-0.47090D-01	0.65987D-04	0.16296D-03	-0.41267D-13	0.23610D-03
0.46350D-01	0.46223D-01	0.46331D-01	0.46274D-01	0.50476D-01
0.45279D-01	0.10000D+01	0.25409D-03	0.41353D-03	0.17484D-02
-0.23749D-07	0.11281D-03	0.60957D-04	0.25623D-03	-0.42263D-04
0.13361D-03	0.12803D-03	-0.26194D-08		

## CAPITOLO 9. Applicazione del Modello di Regressione Logistica

File: C:\dati\_sicilia\_uni\temp\_gela\_2\logpol.out 14/10/2010, 14.55.11

```

0.13246D-12  -0.10000D+01  -0.10000D+01  -0.10000D+01  -0.10000D+01
-0.10000D+01  -0.10000D+01  0.00000D+00

```

\*\*\*\*\* WARNING \*\*\*\*\*

IF AT LEAST ONE OF THE VARIANCES IS PRINTED 0., ESTIMATES OF COEFFICIENTS  
ARE NOT MEANINGFUL  
DUE TO USE OF THE GENERALIZED INVERSE MATRIX, HOWEVER, THE ESTIMATES OF  
FREQUENCIES ARE MEANINGFUL.

ESTIMATED FREQUENCIES AND PROBABILITIES FOR OBSERVATIONS WITH Y(I) > 0

CELL NO	** PROBABILITIES ***		SD	** COMPONENTS OF ***	
	OBSERVED	ESTIMATED		CHISQUARE	DEVIANCE
1	1.000	0.00189	0.00040	527.25079	12.53914
2	1.000	0.00345	0.00036	288.55316	11.33668
3	1.000	0.00077	0.00010	1297.21997	14.33750
4	1.000	0.00171	0.00052	584.22266	12.74399
5	1.000	0.00309	0.00030	322.38220	11.55767
6	1.000	0.00393	0.00045	253.22681	11.07645
7	1.000	0.01513	0.00190	65.09033	8.38204
8	1.000	0.00202	0.00037	494.42450	12.41083
9	1.000	0.02451	0.00294	39.79985	7.41736
10	1.000	0.00642	0.00086	154.83696	10.09762
11	1.000	0.00175	0.00023	570.86444	12.69780
12	1.000	0.00293	0.00040	340.85318	11.66876
13	1.000	0.00441	0.00017	225.81367	10.84826
14	1.000	0.00098	0.00009	1015.16766	13.84759
15	1.000	0.00736	0.00046	134.82941	9.82280
16	1.000	0.00165	0.00016	606.13922	12.81752
17	1.000	0.00561	0.00040	177.37354	10.36776
18	1.000	0.00492	0.00028	202.11801	10.62757
19	1.000	0.00914	0.00088	108.45606	9.39105
20	1.000	0.00792	0.00088	125.32802	9.67776
21	1.000	0.03463	0.00292	27.87794	6.72616
22	1.000	0.02146	0.00204	45.59274	7.68289
23	1.000	0.00125	0.00013	797.40039	13.36522
24	1.000	0.00110	0.00011	908.64160	13.62610
25	1.000	0.00308	0.00066	324.10092	11.56827
26	1.000	0.00195	0.00026	510.96103	12.47650
27	1.000	0.00486	0.00059	204.96667	10.65543
28	1.000	0.00161	0.00018	620.72998	12.86501
29	1.000	0.00719	0.00057	138.07504	9.87003
30	1.000	0.00064	0.00012	1556.92151	14.70222
31	1.000	0.00288	0.00047	346.32123	11.70050
32	1.000	0.00314	0.00038	317.03137	11.52430
33	1.000	0.00481	0.00081	206.78236	10.67298
34	1.000	0.00107	0.00020	929.61115	13.67168
35	1.000	0.00366	0.00064	272.03061	11.21917
36	1.000	0.00310	0.00043	321.49106	11.55215
37	1.000	0.00211	0.00023	473.12875	12.32296
38	1.000	0.00941	0.00067	105.24265	9.33145
39	1.000	0.00816	0.00100	121.61473	9.61809
40	1.000	0.00741	0.00040	133.98407	9.81031
41	1.000	0.03565	0.00337	27.05195	6.66812
42	1.000	0.00166	0.00016	602.33862	12.80496
43	1.000	0.00827	0.00049	119.92449	9.59033
44	1.000	0.00223	0.00032	448.40619	12.21585
45	1.000	0.00185	0.00019	539.13245	12.58363

Pagina: 9

## CAPITOLO 9. Applicazione del Modello di Regressione Logistica

File: C:\dati\_sicilia\_uni\temp\_gela\_2\logpol.out 14/10/2010, 14.55.11

109	1.000	0.00082	0.00013	1217.12537	14.21014
110	1.000	0.00614	0.00117	161.81937	10.18528

ESTIMATED FREQUENCIES AND PROBABILITIES FOR OBSERVATIONS WITH Y(I) = 0

CELL NO	** PROBABILITIES **		SD	** COMPONENTS OF **	
	OBSERVED	ESTIMATED		CHISQUARE	DEVIANCE
1	0.000	0.00119	0.00029	0.00119	0.00238
2	0.000	0.00027	0.00007	0.00027	0.00053
3	0.000	0.00217	0.00035	0.00218	0.00435
4	0.000	0.00189	0.00040	0.00190	0.00379
5	0.000	0.00042	0.00010	0.00042	0.00084
6	0.000	0.00135	0.00032	0.00135	0.00270
7	0.000	0.00098	0.00019	0.00098	0.00195
8	0.000	0.00345	0.00036	0.00347	0.00692
9	0.000	0.00137	0.00022	0.00137	0.00274
10	0.000	0.00246	0.00037	0.00247	0.00493
11	0.000	0.00036	0.00012	0.00036	0.00072
12	0.000	0.00057	0.00018	0.00058	0.00115
13	0.000	0.00077	0.00010	0.00077	0.00154
14	0.000	0.00048	0.00009	0.00048	0.00097
15	0.000	0.00022	0.00005	0.00022	0.00043
16	0.000	0.00013	0.00004	0.00013	0.00026
17	0.000	0.00055	0.00010	0.00055	0.00110
18	0.000	0.00312	0.00077	0.00313	0.00625
19	0.000	0.00196	0.00052	0.00197	0.00393
20	0.000	0.00052	0.00020	0.00052	0.00104
21	0.000	0.00033	0.00013	0.00033	0.00065
22	0.000	0.00008	0.00003	0.00008	0.00016
23	0.000	0.00044	0.00012	0.00044	0.00087
24	0.000	0.00070	0.00018	0.00070	0.00139
25	0.000	0.00107	0.00034	0.00108	0.00215
26	0.000	0.00024	0.00008	0.00024	0.00048
27	0.000	0.00171	0.00052	0.00171	0.00342
28	0.000	0.00155	0.00030	0.00155	0.00310
29	0.000	0.00038	0.00012	0.00038	0.00076
30	0.000	0.00030	0.00008	0.00030	0.00060
31	0.000	0.00041	0.00013	0.00041	0.00082
32	0.000	0.00026	0.00009	0.00026	0.00051
33	0.000	0.00085	0.00023	0.00085	0.00170
34	0.000	0.00019	0.00005	0.00019	0.00038
35	0.000	0.00059	0.00020	0.00059	0.00118
36	0.000	0.00013	0.00005	0.00013	0.00026
37	0.000	0.00006	0.00002	0.00006	0.00011
38	0.000	0.00094	0.00029	0.00094	0.00188
39	0.000	0.00009	0.00003	0.00009	0.00018
40	0.000	0.00007	0.00003	0.00007	0.00015
41	0.000	0.00035	0.00007	0.00035	0.00069
42	0.000	0.00011	0.00004	0.00011	0.00023
43	0.000	0.00051	0.00016	0.00051	0.00103
44	0.000	0.00309	0.00030	0.00310	0.00619
45	0.000	0.00069	0.00009	0.00069	0.00138
46	0.000	0.00141	0.00043	0.00141	0.00282
47	0.000	0.00061	0.00020	0.00061	0.00123
48	0.000	0.00078	0.00029	0.00078	0.00156
49	0.000	0.00014	0.00005	0.00014	0.00027
50	0.000	0.00012	0.00005	0.00012	0.00023
51	0.000	0.00309	0.00069	0.00310	0.00619
52	0.000	0.00169	0.00036	0.00170	0.00339
53	0.000	0.00038	0.00009	0.00038	0.00076
54	0.000	0.00043	0.00016	0.00043	0.00086
55	0.000	0.00024	0.00010	0.00024	0.00047

Pagina: 11

## CAPITOLO 9. Applicazione del Modello di Regressione Logistica

File: C:\dati\_sicilia\_uni\temp\_gela\_2\logpol.out 14/10/2010, 16.03.41

658	0.00882	0.78120	0.82982	0.04862
659	0.00886	0.78122	0.82982	0.04860
660	0.00914	0.78758	0.83031	0.04273
661	0.00941	0.82856	0.85287	0.02431
662	0.00946	0.82877	0.85287	0.02410
663	0.00959	0.82905	0.85287	0.02382
664	0.00970	0.82911	0.85287	0.02376
665	0.00992	0.82912	0.85287	0.02375
666	0.01037	0.82959	0.85287	0.02328
667	0.01062	0.83300	0.85974	0.02673
668	0.01068	0.83350	0.85974	0.02624
669	0.01077	0.83363	0.85974	0.02611
670	0.01082	0.83363	0.85974	0.02611
671	0.01116	0.83380	0.85974	0.02593
672	0.01141	0.83386	0.85974	0.02587
673	0.01157	0.83392	0.85974	0.02582
674	0.01186	0.83414	0.85974	0.02559
675	0.01192	0.83430	0.85974	0.02543
676	0.01198	0.84013	0.86170	0.02156
677	0.01206	0.84746	0.87151	0.02404
678	0.01235	0.90060	0.90878	0.00818
679	0.01240	0.90069	0.90878	0.00809
680	0.01255	0.90071	0.90878	0.00807
681	0.01272	0.90074	0.90878	0.00804
682	0.01316	0.90076	0.90878	0.00802
683	0.01327	0.90371	0.91810	0.01439
684	0.01345	0.91565	0.93085	0.01520
685	0.01356	0.91595	0.93085	0.01490
686	0.01399	0.91713	0.93085	0.01372
687	0.01410	0.91733	0.93085	0.01352
688	0.01417	0.92161	0.93183	0.01021
689	0.01513	0.92356	0.93379	0.01023
690	0.01530	0.92818	0.93919	0.01101
691	0.01538	0.92858	0.93919	0.01061
692	0.01724	0.92865	0.93968	0.01102
693	0.01776	0.92891	0.93968	0.01077
694	0.01811	0.92891	0.93968	0.01077
695	0.01925	0.92941	0.93968	0.01027
696	0.01941	0.92967	0.93968	0.01001
697	0.02003	0.93384	0.94752	0.01368
698	0.02011	0.93412	0.94752	0.01340
699	0.02036	0.93437	0.94752	0.01315
700	0.02146	0.94189	0.95880	0.01692
701	0.02210	0.94189	0.95880	0.01691
702	0.02285	0.94267	0.95880	0.01613
703	0.02451	0.94581	0.96616	0.02035
704	0.02524	0.94646	0.96616	0.01970
705	0.02565	0.94654	0.96616	0.01962
706	0.03075	0.94704	0.96616	0.01912
707	0.03228	0.94704	0.96616	0.01912
708	0.03463	0.96274	0.98333	0.02059
709	0.03565	0.97159	0.98872	0.01713
710	0.04063	0.97170	0.98872	0.01702
711	0.04933	0.97298	0.99068	0.01770
712	0.05701	0.99253	1.00000	0.00747

TOTAL NUMBER OF DEPOSITS: EST. =48150.77 OBS. =48170.00

TOTAL NUMBER OF DEPOSITS: EST. =48150.77 OBS. =48170.00



Nella tabella di figura 9.11 sono riassunti i coefficienti di regressione logistica della costante e di tutte le 22 variabili indipendenti relative alla sola macroarea 1.

I coefficienti elencati indicano, a secondo del loro valore, il grado di importanza di ogni singola variabile nel determinare i valori di probabilità a posteriori, nel nostro caso per la litologia la classe 6 (complesso evaporitico) e 4 (complesso argilloso) presentano i valori più alti, quindi sono quelle maggiormente influenti. Per l'uso del suolo abbiamo la classe 7 (zone urbanizzate) e la classe 5 (colture permanenti), per il curve number la classe 98 e per l'indice di anomalia pluviometrica la classe compresa tra 0.00-0.35.

ID	Theme	Coefficients	LR Std Dev
1	Constant Value	-10.37401600000	0.30634800000
2	ia_3classi_ge.ia_3classi_ge_CT(35.0)	0.72526700000	0.18021700000
3	ia_3classi_ge.ia_3classi_ge_CT(51.0)	0.35602700000	0.09775800000
4	ia_3classi_ge.ia_3classi_ge_CT(60.0)	0.00000000000	0.00000000000
5	slp_gel_rech.slp_gel_rech_CD	1.50309900000	0.08497500000
6	clc_gela_fr.clc_gela_fr_CT(1.0)	0.67727800000	0.21896500000
7	clc_gela_fr.clc_gela_fr_CT(2.0)	0.78813600000	0.22981100000
8	clc_gela_fr.clc_gela_fr_CT(3.0)	0.32401800000	0.25473000000
9	clc_gela_fr.clc_gela_fr_CT(5.0)	1.18297700000	0.22231700000
10	clc_gela_fr.clc_gela_fr_CT(6.0)	0.91873000000	0.22467000000
11	clc_gela_fr.clc_gela_fr_CT(7.0)	2.27723900000	0.22824600000
12	clc_gela_fr.clc_gela_fr_CT(99.0)	0.00000000000	0.00000000000
13	cn_gela_9.cn_gela_9_CT(60.0)	-0.10280600000	0.22871100000
14	cn_gela_9.cn_gela_9_CT(68.0)	-0.33829100000	0.11780500000
15	cn_gela_9.cn_gela_9_CT(98.0)	0.48191300000	0.07427800000
16	cn_gela_9.cn_gela_9_CT(99.0)	0.00000000000	0.00000000000
17	lito_gela2.lito_gela2_CT(1.0)	-0.88134000000	0.30706200000
18	lito_gela2.lito_gela2_CT(2.0)	0.31200600000	0.22837600000
19	lito_gela2.lito_gela2_CT(3.0)	-0.01263900000	0.16088900000
20	lito_gela2.lito_gela2_CT(4.0)	0.91480300000	0.10814800000
21	lito_gela2.lito_gela2_CT(5.0)	0.48714700000	0.15181900000
22	lito_gela2.lito_gela2_CT(6.0)	1.43679200000	0.11099600000
23	lito_gela2.lito_gela2_CT(7.0)	0.00000000000	0.00000000000

Figura 9.11: Stralcio del file LR\_Coeff.dbf per la macroarea 1

Come spiegato nel paragrafo 8.2 in un modello di Regressione Logistica, la relazione tra  $z$  e la probabilità che un evento accada è data dalla seguente espressione:

$$P = \frac{1}{1+e^{-Y}}$$

dove  $P$  rappresenta la probabilità che si verifichi il fenomeno.

$$Y = (\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i)$$

$\alpha$  =intercetta del modello o *Constant Value*

$\beta_i = (i = 0, 1, 2, \dots, n)$  rappresentano i coefficienti di regressione logistica

$X_i = (i = 0, 1, 2, \dots, n)$  rappresentano i predittori o variabili indipendenti

Nella tabella di figura 9.12 è presente uno stralcio del file denominato *LRlogpol.dbf* che riassume i valori di probabilità a posteriori, della relativa standard deviation e dello student-t value, inteso come il rapporto tra i valori di probabilità a posteriori e la relativa standard deviation, il quale esprime i gradi di significatività tra i valori.

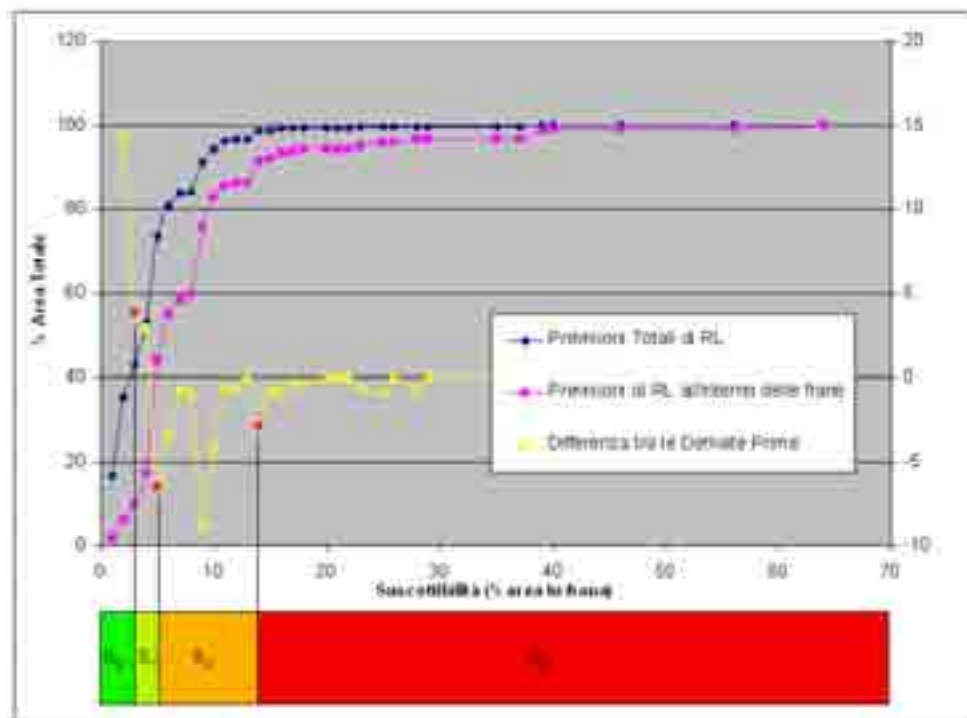
ID	LRPostProb	LR Std Dev	LRTValue
1	0.00119000000	0.00029000000	4.07243000000
2	0.00027000000	0.00007000000	3.83315000000
3	0.00217000000	0.00035000000	6.13466000000
4	0.00189000000	0.00040000000	4.72203000000
5	0.00042000000	0.00010000000	4.35913000000
6	0.00135000000	0.00032000000	4.20337000000
7	0.00098000000	0.00019000000	5.03756000000
8	0.00345000000	0.00036000000	9.70346000000
9	0.00137000000	0.00022000000	6.09515000000
10	0.00246000000	0.00037000000	6.60442000000
11	0.00036000000	0.00012000000	3.06023000000
12	0.00057000000	0.00018000000	3.27240000000
13	0.00077000000	0.00010000000	7.45198000000
14	0.00048000000	0.00009000000	5.42337000000
15	0.00022000000	0.00005000000	4.80868000000
16	0.00013000000	0.00004000000	3.14098000000
17	0.00055000000	0.00010000000	5.70521000000
18	0.00312000000	0.00077000000	4.05568000000
19	0.00196000000	0.00052000000	3.75218000000
20	0.00052000000	0.00020000000	2.63485000000
-	-	-	-
-	-	-	-
708	0.00040000000	0.00009000000	4.21985000000
709	0.00232000000	0.00050000000	4.68727000000
710	0.00052000000	0.00012000000	4.46169000000
711	0.00065000000	0.00016000000	4.08608000000
712	0.00156000000	0.00032000000	4.85623000000

Figura 9.12: Stralcio del file *LR\_logpol.dbf* per la macroarea 1

### 9.3 Individuazione delle classi di suscettibilità

Come si è visto al modello di regressione logistica è stato assegnato il compito più impegnativo, ossia la previsione di un valore di probabilità di franosità a posteriori compreso tra 0 e 1. Il valore di uscita è stato trattato con cautela, valutandone il corretto significato di volta in volta, a seconda delle caratteristiche dell'area indagata. Infatti, in dipendenza dal dato di ingresso e di addestramento, anche quello di uscita esprime la proporzione di area in frana attesa all'interno delle UCU, da 0 (0% in frana) a 1 (100% in frana). Si tratta evidentemente di un dato probabilistico, che deve essere trattato come tale. La variazione dei valori di previsione è continua ma mostra irregolarità rivelatrici di possibili limiti tra gruppi di UCU. Per gli scopi di costruzione della carta di suscettibilità, è necessario individuare quali sono queste soglie che caratterizzano classi di comportamento diverse. Tali classi, una volta delimitate, costituiranno le classi di suscettibilità [80].

L'individuazione delle diverse classi di suscettibilità non può basarsi su dati arbitrari ma deve essere fondata sull'individuazione di soglie fisiche, che contraddistinguono il passaggio del versante da uno stato di equilibrio ad un altro. Un sistema molto robusto per l'individuazione di queste soglie è basato sulle cumulate delle aree al crescere del valore di uscita dal modello [81, 82]. Per ogni output relativo ad ogni singola macroarea si diagrammano in un grafico i valori di uscita del modello e l'area percentuale cumulata relativa, sia per le aree totali che per le aree relative alle sole zone di distacco del corpo di frana. Consistenti e repentini salti verticali nella curva delle frane, che risultino nettamente maggiori dei corrispondenti incrementi nella cumulata totale, indicano valori in corrispondenza dei quali si ha un notevole incremento nel numero di pixel in frana individuati e quindi possibili valori di soglia. Un sistema ancora migliore è quello di plottare, insieme alle cumulate, anche la differenza tra le derivate prime di queste, che mostra il confronto tra i diversi incrementi sopra specificati in modo numerico. La figura 9.13 riproduce il grafico delle cumulate relative alla macroarea 1 (bacino di Gela-Platani-Salvo), con l'individuazione dei valori soglia ottimali che distinguono le varie classi (da S0 a S3). I punti di minimo relativo nella curva delle differenze tra le derivate (pallini rossi) sono quelli dove tali limiti sono meglio localizzabili.



**Figura 9.13:** Grafico per l'individuazione delle soglie di suscettibilità per la Macroarea 1 (Bacino Gela-Platani-Salvo)

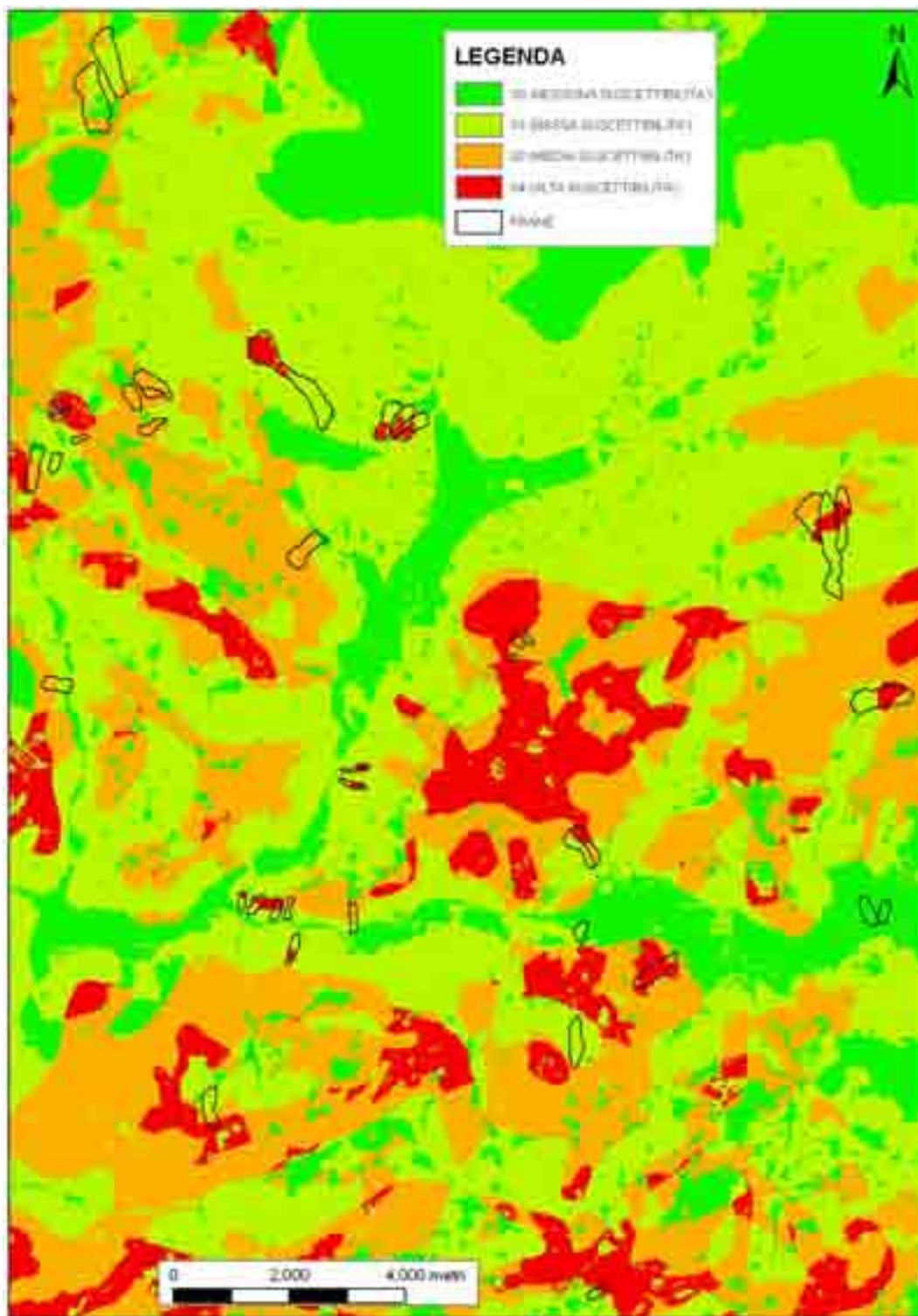
La curva in blu scuro è la cumulata di tutta l'area in frana. La curva in viola è la cumulata relativa alle sole aree di scarpata. Le soglie sono individuate sulla curva in giallo nei punti di minimo relativo (pallini rossi) e sono poi utilizzate per definire gli intervalli delle classi di suscettibilità.

I grafici delle cumulate per la definizione delle soglie nelle altre macroaree sono riportati nelle seguenti figure 9.16, 9.17, 9.18, 9.19 e 9.20.

Una volta scelti tali valori essi sono stati utilizzati, come mostrato in figura 9.14, per delimitare classi di suscettibilità da impiegare poi nella riclassificazione delle mappe (S0, S1, S2, S3) [84]. È chiaro che, in generale, i risultati dipenderanno dalla scelta delle soglie: limiti più cautelativi porteranno ad un maggior numero di falsi positivi mentre soglie più alte genereranno un certo numero di falsi negativi (frane non correttamente individuate). Nel caso considerato è stato scelto un approccio del primo tipo, nel quale ai falsi positivi possono in realtà corrispondere vere frane che sono sfuggite alla procedura di rilevamento.

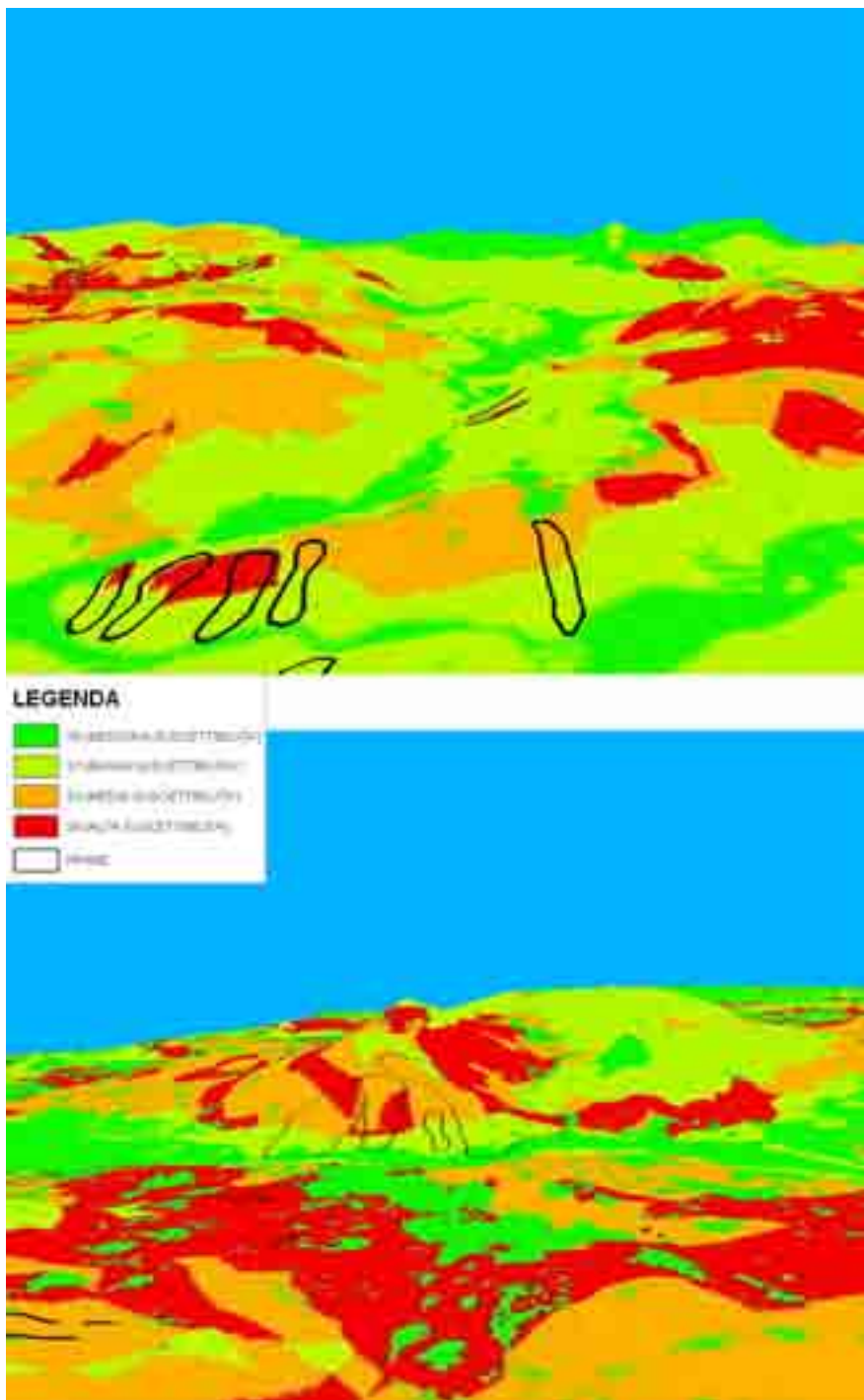
La figura 9.14 e la figura 9.15 riportano un esempio di questo criterio di zonazione, per la macroarea 1. È possibile notare la presenza sia di falsi positivi che di falsi negativi.





**Figura 9.14:** Esempio di classi di suscettibilità generate nella macroarea 1 (Gela-Platani-Salvo)

Si notano sia casi di *Falsi Negativi* (frane mappate in zone a nessuna-bassa suscettibilità (S0-S1)) che casi di *Falsi Positivi* (aree ad alta suscettibilità (S2-S3) senza che vi siano state mappate delle frane).



**Figura 9.15:** Esempio di classi di suscettibilità in 3D generate nella macroarea 1 (Gela-Platani-Salso)

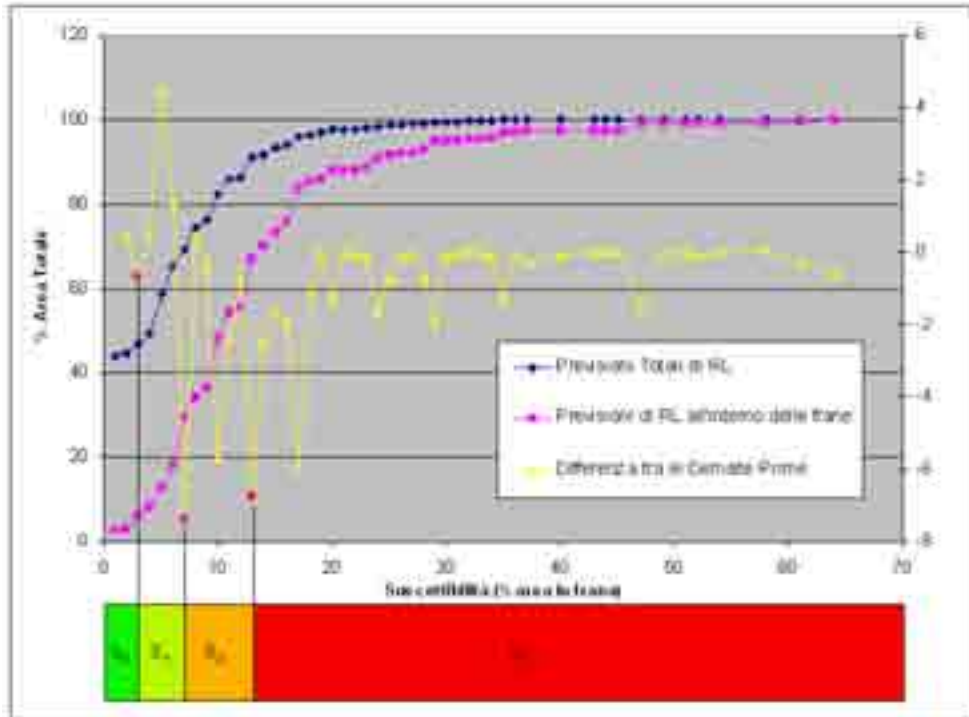


Figura 9.16: Grafico per l'individuazione delle soglie di suscettibilità per la Macroarea 2 (Val di Mazara)

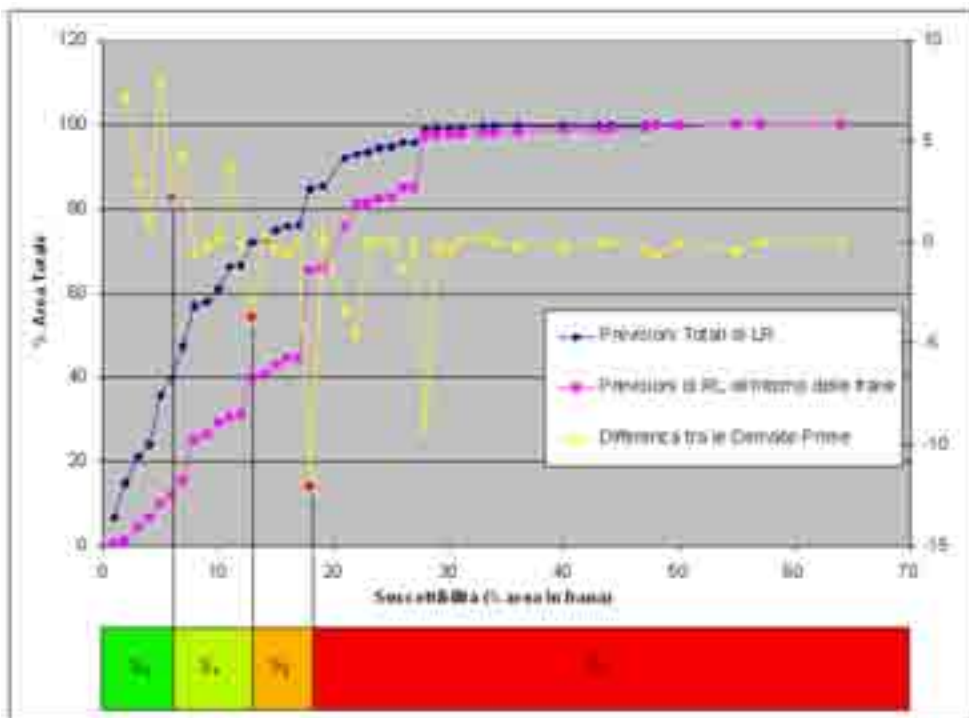


Figura 9.17: Grafico per l'individuazione delle soglie di suscettibilità per la Macroarea 3 (Versante Tirrenico)

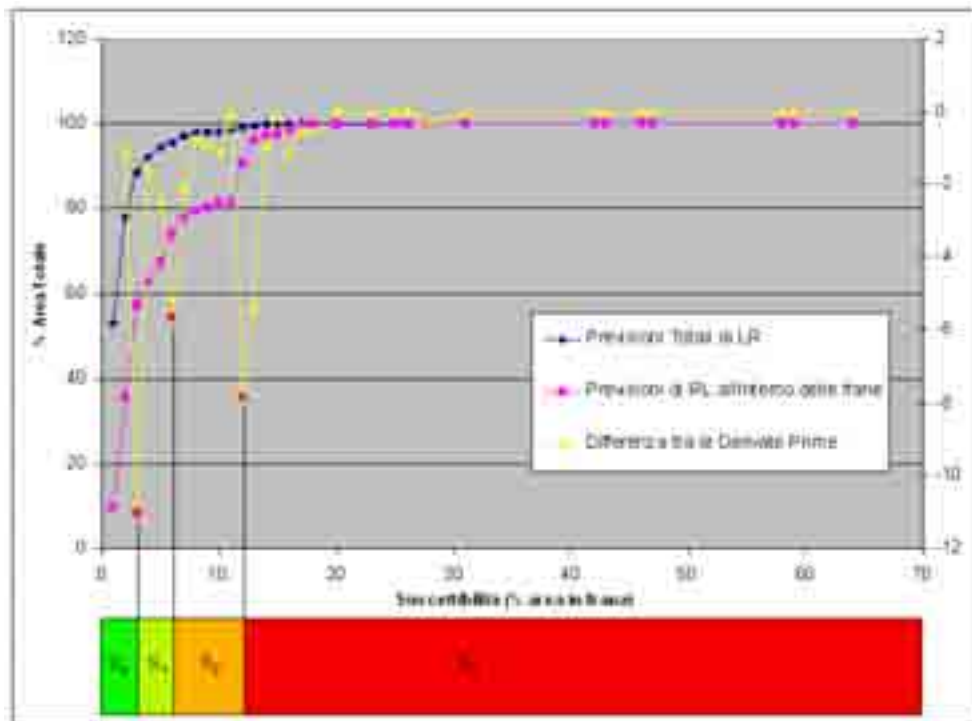


Figura 9.18: Grafico per l'individuazione delle soglie di suscettibilità per la Macroarea 4 (Bacino del Simeto)

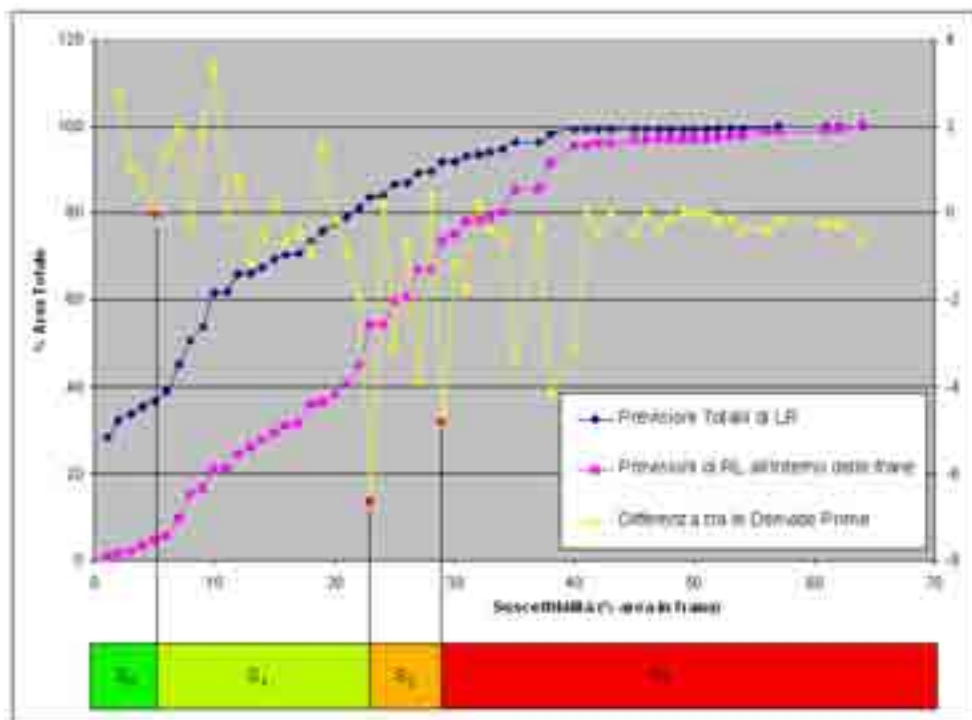
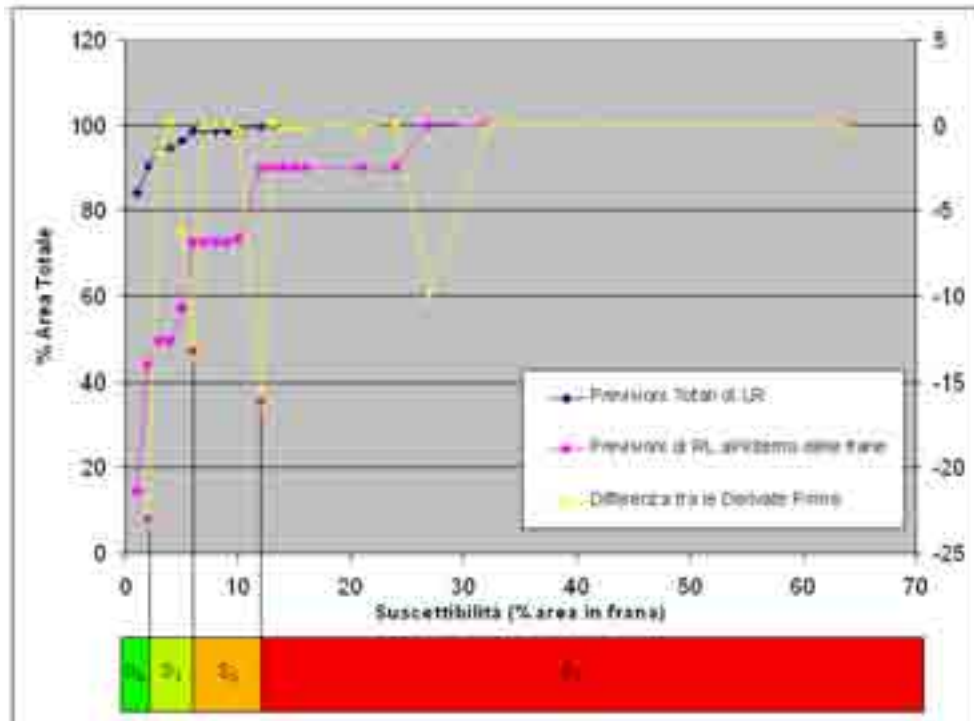


Figura 9.19: Grafico per l'individuazione delle soglie di suscettibilità per la Macroarea 5 (Monti Peloritani)





**Figura 9.20:** Grafico per l'individuazione delle soglie di suscettibilità per la Macroarea 6 (Val di Noto)

### *Falsi Negativi*

I casi di frane inventariate che cadono in aree interpretate a suscettibilità basso-media (S0-S1) (fig. 9.14) possono essere interpretati in vari modi:

i) aree erroneamente mappate come frane in inventario ma in realtà stabili o interessate da fenomeni di altro tipo;

ii) aree effettivamente in frana ma aventi caratteristiche predisponenti non coerenti con quelle tipiche della maggioranza delle frane nella macroarea. In quest'ultimo caso la causa più probabile di non corrispondenza è la insufficiente definizione di scala del parametro "litologico", basato sulla scala 1:100000 e su suddivisioni stratigrafico-litologiche che non distinguono membri di formazione con caratteristiche estremamente diverse mappandoli come un solo poligono. Un notevole miglioramento da questo punto di vista potrà aversi con l'adozione di cartografia geologica a scala 1:10000, chiaramente solo quando questa sarà disponibile come dato a scala nazionale.

*Falsi Positivi*

Le aree che il modello di regressione logistica assegna alla classe di alta suscettibilità (S2-S3) ma che non presentano nessuna frana mappata in inventario sono un caso ancor più ricorrente del precedente (fig. 9.14). Si tratta di un problema di importanza minore visto che va nella direzione di maggiore cautela e non in quello opposto. Oltretutto si tratta di un caso che rivela interessanti opportunità di perfezionamento o aggiornamento dell'inventario. Sono infatti possibili le seguenti interpretazioni:

i) aree che il modello ritiene suscettibili di frane di neo-formazione (da tenere quindi sotto controllo o da controllare con particolare attenzione);

ii) aree nelle quali il modello rivela la presenza di fenomeni sfuggiti alla mappatura di inventario (nelle quali quindi ancora una volta sarebbe necessario effettuare dei sopralluoghi di verifica);

iii) aree nelle quali il modello valuta in modo erroneo la pericolosità, forse anche in questo caso per difetti imputabili principalmente al parametro di classificazione litotecnica.

In particolare, il caso (ii), quello di possibili frane sfuggite all'inventario, pare il più ricorrente come provano la forma di molte delle aree S2-S3 di falso allarme (tipica di quella planimetrica dei corpi di frana).

# Capitolo 10

## Analisi e validazione dei risultati

Per ognuna delle sei macroaree nella quali è stata suddivisa l'area in esame è stata prodotta su base statistica una carta di suscettibilità. I valori di output del modello di regressione logistica sono stati riclassificati in quattro classi di suscettibilità: S0 (suscettibilità nulla), S1 (suscettibilità bassa), S2 (suscettibilità media), S3 (suscettibilità elevata) secondo la procedura trattata nel paragrafo 9.3. Dal confronto fra le carte di suscettibilità prodotte e la morfologia del territorio possono essere tratte alcune considerazioni generali. Innanzitutto si può osservare come esista una forte correlazione fra il rilievo e la suscettibilità, connessa al ruolo essenziale giocato dalla pendenza nella stabilità dei versanti.

La validazione del modello ottenuto è stata realizzata sia mediante le tabelle di contingenza *Previsto-Osservato* che mediante la *curva di ROC* [85]. Per poter applicare le due metodologie su esposte, il dataset di punti (come precedentemente spiegato) è stato preventivamente suddiviso in due subset scelti in maniera random: uno (training set) pari a circa l'70% del totale è stato utilizzato per la realizzazione del modello; l'altro (validation set) pari al restante 30% è stato impiegato per valutare la capacità previsionale del modello.

I primi tre data layers (fattori predisponenti o variabili indipendenti) ad essere stati incrociati nel modello previsionale sono stati la pendenza, la litologia e l'uso del suolo.

L'aggiunta del Curve Number (modello a quattro variabili) migliora vistosamente la qualità della previsione, mentre di contro l'aggiunta dell'informazione relativa all'indice di anomalia pluviometrica (modello a cinque variabili) non evidenzia grossi miglioramenti nella capacità previsionale. Possiamo quindi concludere che la combinazione a quattro e cinque variabili consente di conseguire degli ottimi risultati. Dal punto di vista dell'im-

portanza e della significatività dei fattori studiati, sicuramente la pendenza dei versanti, la litologia e il curve number incidono in maniera più marcata sulla stabilità.

Di seguito vengono presentati e discussi in dettaglio i risultati ottenuti nelle sei macroaree. Per ognuna delle sei macroaree è stata seguita la procedura descritta nel paragrafo 4.2. Inoltre nella tabella 10.1 sono presentati i valori di  $Se$  e  $Sp$  della procedura di validazione del modello a cinque variabili, sia sui dati di training che sui dati di validation, che hanno permesso di valutare la qualità dei risultati predittivi del modello di suscettibilità.

	Training Set	Training Set	Validation Set	Validation Set
Macroaree	$Se(\%)$	$Sp(\%)$	$Se(\%)$	$Sp(\%)$
1	72.28	83.05	90.62	82.93
2	74.62	74.40	89.31	74.35
3	81.88	63.97	83.47	63.78
4	84.43	85.94	85.30	85.83
5	85.64	70.57	95.09	70.40
6	79.49	94.61	65.53	94.61

**Tabella 10.1:** Tabella riassuntiva dei valori di  $Se$  e di  $Sp$  relative al modello di regressione logistica a cinque variabili nelle sei macroaree.

## 10.1 Macroarea 1 (Bacino di Gela-Platani-Salzo)

La macroarea 1 o bacino di Gela-Platani-Salzo si trova nel settore centro-meridionale della Sicilia copre un'area di  $5708.88 \text{ km}^2$ . L'area è costituita da quattro gruppi di terreni, dei quali tre di essi rappresentano dei complessi tettonici, mentre l'ultimo è costituito da successioni di *piggy-back* depositatesi sul dorso dei tre complessi tettonici [83]. I tre complessi tettonici rappresentano, dal basso verso l'alto:

1. la prosecuzione occidentale dell'avampaese ibleo, in parte deformato, costituito da successioni prevalentemente carbonatiche di età mesozoico-pliocenica, che in quest'area si inflette al di sotto della catena siciliana;
2. un gruppo di unità tettoniche derivanti dalla deformazione del dominio sicano, organizzate tettonicamente secondo prevalenti geometrie di duplex;
3. un gruppo di unità tettoniche, largamente affioranti nell'area in studio, costituite da successioni prevalentemente argillose, conglomeratiche ed arenacee, che sono indicate in letteratura con il termine di "Falda di Gela".

Quest'ultimo gruppo di unità rappresenta la quasi totalità degli affioramenti e al suo interno si trovano la gran parte delle evaporiti messiniane[86]. Le unità tettoniche che compongono nel loro complesso la Falda di Gela sono generalmente costituite da: (i) successioni di tipo flysch (Flysch Numidico) di età Oligocene sup.-Miocene; (ii) successioni prevalentemente argillose (unità Sicilidi) di età Cretaceo-Paleogene; (iii) successioni conglomeratiche-arenaceo-argillose (Formazione Terravecchia) di età Tortoniano; (iv) successioni evaporitiche messiniane; (v) successioni carbonatico-marnose pelagiche ("Trubi") di età Pliocene inf.

I terreni argillosi cretaceo-paleogenici ricoprono il 54% dell'area. Le quote, così come le pendenze, sono massime nella zona Nord della macroarea, con altezze che si aggirano intorno ai 1200 metri fino alla quota massima di 1912 metri di Monte San Salvatore. Nella zona a sud in corrispondenza delle città di Agrigento e Gela, le quote, così come le pendenze, degradano fino al livello del mare. La carta di uso del suolo mostra la presenza di un'alta percentuale di terreni coltivati a seminativi (circa il 50%) e di zone a vegetazione arbustiva e/o erbacea (circa il 20%), queste ultime soprattutto in corrispondenza dei rilievi.

Il dataset di frane a cinematisimo lento interessa un'area di circa  $50 \text{ km}^2$  pari allo 0.8% dell'intera macroarea ed è costituito da 438 corpi di frana. Questo è stato suddiviso in due

dataset distinti, uno di training con 357 frane, utilizzato per addestrare il modello di regressione logistica, e uno di validation con 81 frane, per testare la bontà di predizione del modello. Da questi due dataset sono stati estrapolati i pixel relativi alle zone di scarpata secondo la procedura spiegata nel paragrafo 5.4. Dei 63834 pixel relativi alle zone di nicchia, solo 48170 sono stati utilizzati per addestrare il modello.

Le procedure di validazione sono state condotte sull'intero dataset di frane a cinematisimo lento e sono state effettuate incrociando le frane mappate con la previsione ottenuta tramite il modello di regressione logistica. Nelle tabelle tetracoriche seguenti sono riasunte le percentuali di area in frana correttamente classificata (VP), di area non in frana correttamente classificata (VN), di area in frana erroneamente classificata (FN) e di area non in frana erroneamente classificata (FP) sia sul dataset di training utilizzato per addestrare il modello che sul dataset di validation utilizzato per validare il modello. Così come detto precedentemente i primi tre data layers (fattori predisponenti) ad essere stati inseriti nel modello sono stati la Pendenza, la Litologia e l'Uso del Suolo, successivamente è stato aggiunto il layer relativo al Curve Number ed infine il layer relativo all'Indice di Anomalia Pluviometrica. Nella tabella 10.2 relativa al solo set di training, si nota come per la prima combinazione (Pendenza, Litologia e Uso del Suolo) il modello riesce a classificare correttamente il 60.99% di area effettivamente in frana e l'84.19% dell'area non in frana.

Numero Variabili	Tipo di Variabile Indipendente	VP (%)	VN (%)	FN (%)	FP (%)
3	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo	60.99	84.19	39.01	15.81
4	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number	71.96	83.10	28.04	16.90
5	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number + Indice di Anomalia Pluviometrica	72.28	83.05	27.72	16.95

**Tabella 10.2:** Tabella di Contingenza *Previsto-Osservato* sul dataset di training per la Macroarea 1

VP (Veri Positivi) aree previste instabili ed effettivamente osservate instabili; VN (Veri Negativi) aree previste stabili ed effettivamente osservate stabili; FN (Falsi Negativi) aree previste stabili ma osservate instabili; FP (Falsi Positivi) aree previste instabili ma osservate stabili.

Le percentuali crescono di quasi 10 punti percentuali quando nel calcolo viene inserita la quarta variabile (Curve Number), si passa al 71.96% di classificazione corretta per l'area in frana, mentre la percentuale relativa all'area non in frana diminuisce leggermente passando all'83.10%. Poco incisiva è l'introduzione della quinta variabile (l'Indice di Anomalia Pluviometrica): la percentuale di area in frana correttamente classificata cresce solo dello

0.32%, salendo così al 72.28%, mentre la percentuale di area non in frana rimane costante attestandosi sull'83.05%.

Nella tabella 10.3 relativa al solo set di validation, si nota come per la prima combinazione (Pendenza, Litologia e Uso del Suolo) il modello riesce a classificare correttamente l'87.87% di area effettivamente in frana e l'84.11% dell'area non in frana.

Numero Variabili	Tipo di Variabile Indipendente	VP (%)	VN (%)	FN (%)	FP (%)
3	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo	87.87	84.11	12.13	15.89
4	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number	90.72	82.98	9.28	17.02
5	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number + Indice di Anomalia Pluviometrica	90.62	82.93	9.38	17.07

**Tabella 10.3:** Tabella di Contingenza *Previsto-Osservato* sul dataset di validation per la Macroarea 1  
 VP (Veri Positivi) aree previste instabili ed effettivamente osservate instabili; VN (Veri Negativi) aree previste stabili ed effettivamente osservate stabili; FN (Falsi Negativi) aree previste stabili ma osservate instabili; FP (Falsi Positivi) aree previste instabili ma osservate stabili.

Le percentuali crescono di quasi 3 punti percentuali quando nel calcolo viene inserita la quarta variabile (Curve Number), si passa al 90.72% di classificazione corretta per l'area in frana, mentre la percentuale relativa all'area non in frana diminuisce leggermente passando all'82.98%. L'introduzione della quinta variabile (l'Indice di Anomalia Pluviometrica) è in questo caso ininfluenta dato che le percentuali di classificazione corretta rimangono pressoché uguali.

Un ulteriore metodo per paragonare l'accuratezza tra gli output del modello a tre, quattro e cinque variabili è la curva di ROC spiegata nel paragrafo 4.2, dove, come si può vedere nella figura 10.1, plottando in ordinata i valori di *Sensitività* e in ascissa i valori di *1-Specificità (Falsi Positivi)* relativi al solo dataset di training, la curva che più si avvicina all'angolo superiore sinistro del diagramma e che sottende un'area maggiore è quella relativa ai modelli con quattro e cinque variabili; in questi due modelli i valori della curva di ROC sono uguali e pari a 0.78, mentre per il modello a tre variabili il valore è leggermente inferiore, cioè 0.73.

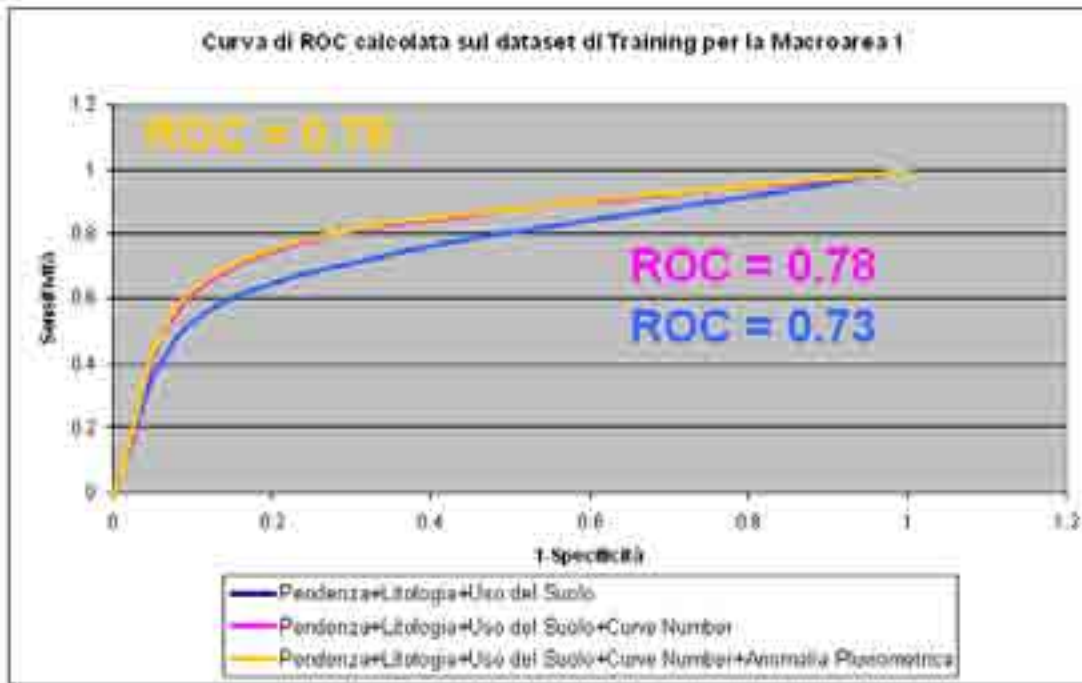


Figura 10.1: Curva di ROC calcolata sul dataset di training per la Macroarea 1

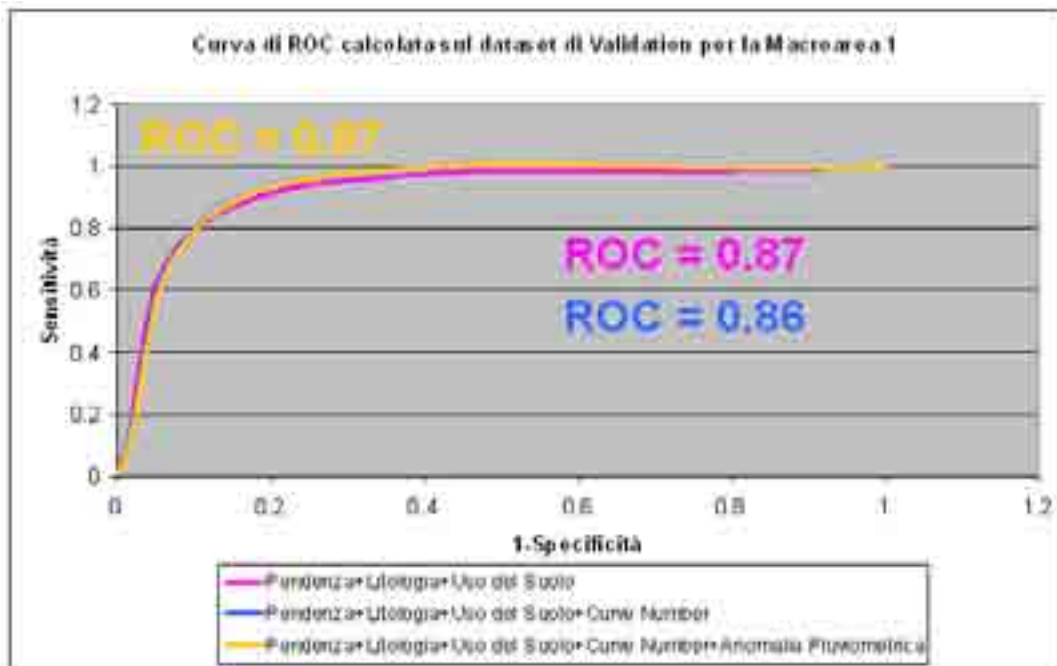
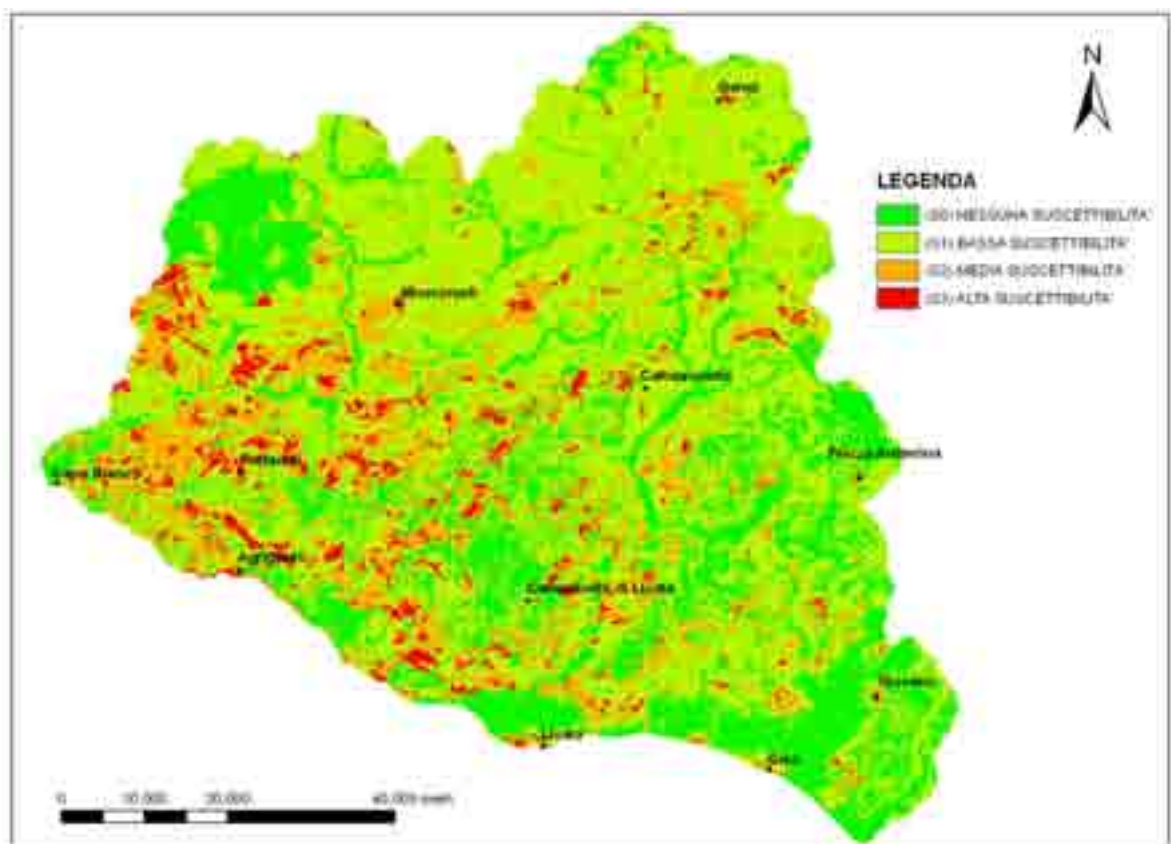


Figura 10.2: Curva di ROC calcolata sul dataset di validation per la Macroarea 1



In figura 10.2 i valori più alti della curva di ROC per il solo dataset di validation sono anche in questo caso quelli relativi ai modelli a quattro e cinque variabili, pari a 0.87; mentre per il modello a tre variabili il valore della curva di ROC è leggermente inferiore ed è uguale a 0.86.

Nella figura sottostante è mostrata la carta di suscettibilità per la macroarea 1 relativa al modello di regressione logistica a cinque variabili.



**Figura 10.3:** Carta di suscettibilità della Macroarea 1 (Bacino Gela-Platani-Salvo)

## 10.2 Macroarea 2 (Val di Mazara)

La macroarea 2 o Val di Mazara ha una estensione di  $5375.84 \text{ km}^2$  con una netta prevalenza di morfologie collinari su quelle pianeggianti e montane. La zona pianeggiante comprende la fascia litoranea che da Trapani arriva all'incirca a Campobello di Mazara con pendenze inferiori al 4%. La porzione di territorio montuosa, con acclività piuttosto accentuata, è

posta nella parte settentrionale dell'area e comprende buona parte dei monti Sicani. Una grande porzione del territorio è di tipo collinare, con pendenze comprese tra il 10% ed il 20% e si sviluppa sia su terreni calcarei che evaporitici, mentre la zona montana vera e propria (oltre gli 800 metri) è costituita da terreni carbonatici caratterizzati da pareti rocciose a strapiombo. Abbastanza numerosi i rilievi oltre i 1000 metri come Monte Cammarata che con i suoi 1524 metri rappresenta la vetta più alta. Procedendo dalla costa verso l'interno si individuano una serie di terrazzi marini posti a diverse quote costituiti prevalentemente da terreni calcarei, calcareo-dolomitici e calcari marnosi di età compresa tra il Trias superiore e l'Olocene. La fascia centro-settentrionale, a sua volta, appare ricoperta da un complesso a comportamento incompetente costituito da argille, marne ed arenarie, con inclusi elementi litoidi di varia natura e con età compresa fra il Cretaceo ed il Miocene. Nel settore centro-occidentale e centro-meridionale si riscontrano i terreni post-tortoniani con facies di regressione e con depositi evaporitici affioranti nei territori di Calatafimi, Salemi, Gibellina e S. Ninfa. L'assetto strutturale mostra la sovrapposizione tettonica verso sud e sud-ovest delle Unità Carbonatiche Panormidi su quelle Trapanesi. La rete idrografica è di tipo dendritica con bacini imbriferi di forma ampia e subcircolare nel settore settentrionale mentre in quello meridionale essa si presenta poco gerarchizzata con bacini di forma stretta e allungata. L'idrografia si è imposta per lo più su terreni argillosi che ricoprono circa il 34% dell'area, contro il 20% dei terreni carbonatici e dei terreni sabbioso-calcarenitici.

La carta di uso del suolo mostra la presenza di un'alta percentuale di terreni a colture permanenti (36%), a seminativi (26%) e di zone a vegetazione arbustiva e/o erbacea (14%).

Il dataset di frane a solo cinematismo lento interessa un'area di circa 46  $km^2$  pari allo 0.8% dell'intera macroarea ed è costituito da 489 corpi di frana. Questo è stato suddiviso in due dataset distinti, uno di training con 367 frane e uno di validation con 122 frane. Da questi due dataset sono stati estrapolati i pixel relativi alle zone di scarpata dove dei 58160 pixel relativi alle zone di nicchia, solo 39260 sono stati utilizzati per addestrare il modello.

Anche in quest'area le procedure di validazione sono state condotte sull'intero dataset di frane a cinematismo lento e sono state effettuate incrociando le frane mappate con la previsione ottenuta tramite il modello di regressione logistica. Nelle tabelle tetracoriche seguenti sono riassunte le percentuali di area in frana correttamente classificata (VP), di area non in frana correttamente classificata (VN), di area in frana erroneamente classificata (FN) e di area non in frana erroneamente classificata (FP) sia sul dataset di training che sul dataset di validation. Nella tabella 10.4 relativa al solo set di training, si nota come per la

prima combinazione (Pendenza, Litologia e Uso del Suolo) il modello riesce a classificare correttamente il 73.03% di area effettivamente in frana e il 72.88% dell'area non in frana.

Numero Variabili	Tipo di Variabile Indipendente	VP (%)	VN (%)	FN (%)	FP (%)
3	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo	73.03	72.88	27.12	26.78
4	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number	74.61	72.33	27.67	25.39
5	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number + Indice di Anomalia Pluviometrica	74.62	74.40	25.60	25.38

**Tabella 10.4:** Tabella di Contingenza *Previsto-Osservato* sul dataset di training per la Macroarea 2

VP (Veri Positivi) aree previste instabili ed effettivamente osservate instabili; VN (Veri Negativi) aree previste stabili ed effettivamente osservate stabili; FN (Falsi Negativi) aree previste stabili ma osservate instabili; FP (Falsi Positivi) aree previste instabili ma osservate stabili.

A differenza della macroarea 1 in questo caso la percentuale cresce solo dell'1.58% quando nel calcolo viene inserita la quarta variabile (Curve Number), si passa quindi al 74.61% di classificazione corretta per l'area in frana, mentre la percentuale relativa all'area non in frana diminuisce leggermente passando al 72.33%. L'introduzione della quinta variabile (l'Indice di Anomalia Pluviometrica) non migliora la capacità predittiva delle aree in frana rimanendo sul 74.62% di classificazione corretta mentre la percentuale delle aree non in frana cresce sino al 74.40%.

Nella tabella 10.5 relativa al solo set di validation, si nota come per la prima combinazione (Pendenza, Litologia e Uso del Suolo) il modello riesce a classificare correttamente l'80.66% di area effettivamente in frana e il 72.82% dell'area non in frana.

Numero Variabili	Tipo di Variabile Indipendente	VP (%)	VN (%)	FN (%)	FP (%)
3	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo	80.66	72.82	27.18	19.34
4	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number	88.28	72.28	27.72	11.72
5	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number + Indice di Anomalia Pluviometrica	89.31	74.35	25.65	10.69

**Tabella 10.5:** Tabella di Contingenza *Previsto-Osservato* sul dataset di validation per la Macroarea 2

VP (Veri Positivi) aree previste instabili ed effettivamente osservate instabili; VN (Veri Negativi) aree previste stabili ed effettivamente osservate stabili; FN (Falsi Negativi) aree previste stabili ma osservate instabili; FP (Falsi Positivi) aree previste instabili ma osservate stabili.

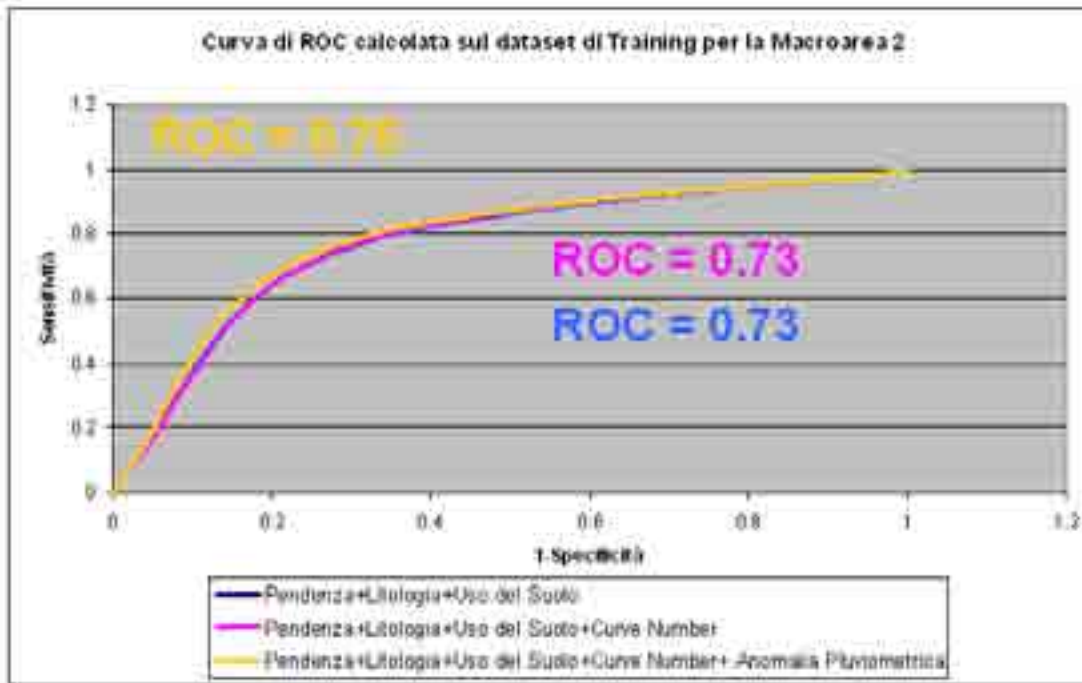


Figura 10.4: Curva di ROC calcolata sul dataset di training per la Macroarea 2

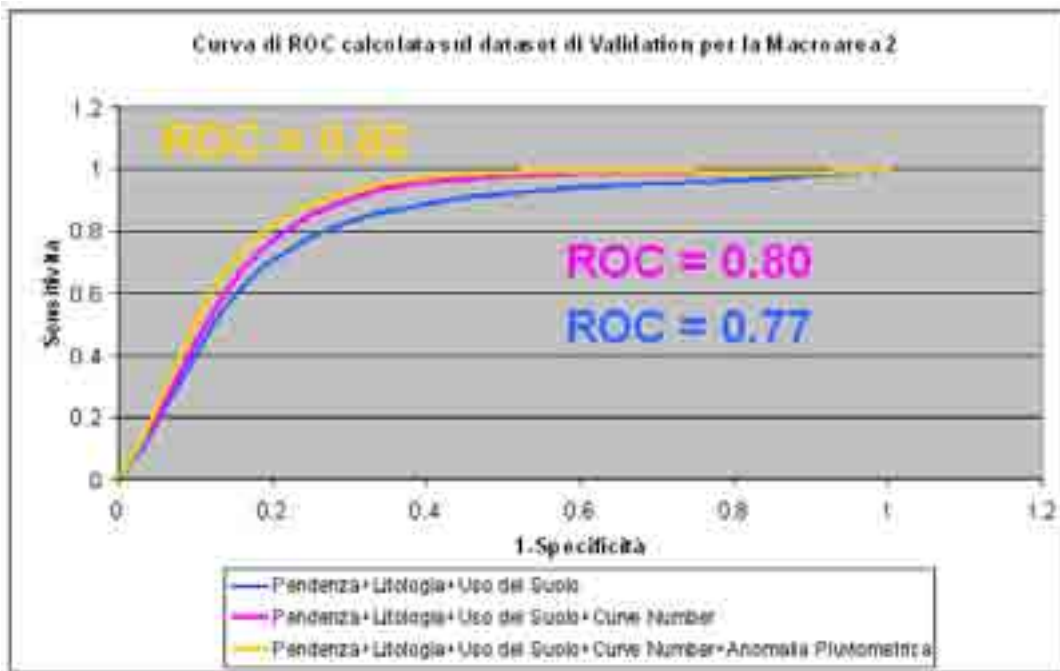


Figura 10.5: Curva di ROC calcolata sul dataset di validation per la Macroarea 2

Le percentuali crescono vistosamente quando viene introdotta la quarta variabile (Curve Number), passando all'88.28% di classificazione corretta per l'area in frana, mentre la percentuale relativa all'area non in frana diminuisce leggermente passando al 72.28%. L'introduzione della quinta variabile (l'Indice di Anomalia Pluviometrica) consente un miglioramento sia nel classificare le aree in frana che non in frana con percentuali che si attestano rispettivamente all'89.31% e al 74.35%.

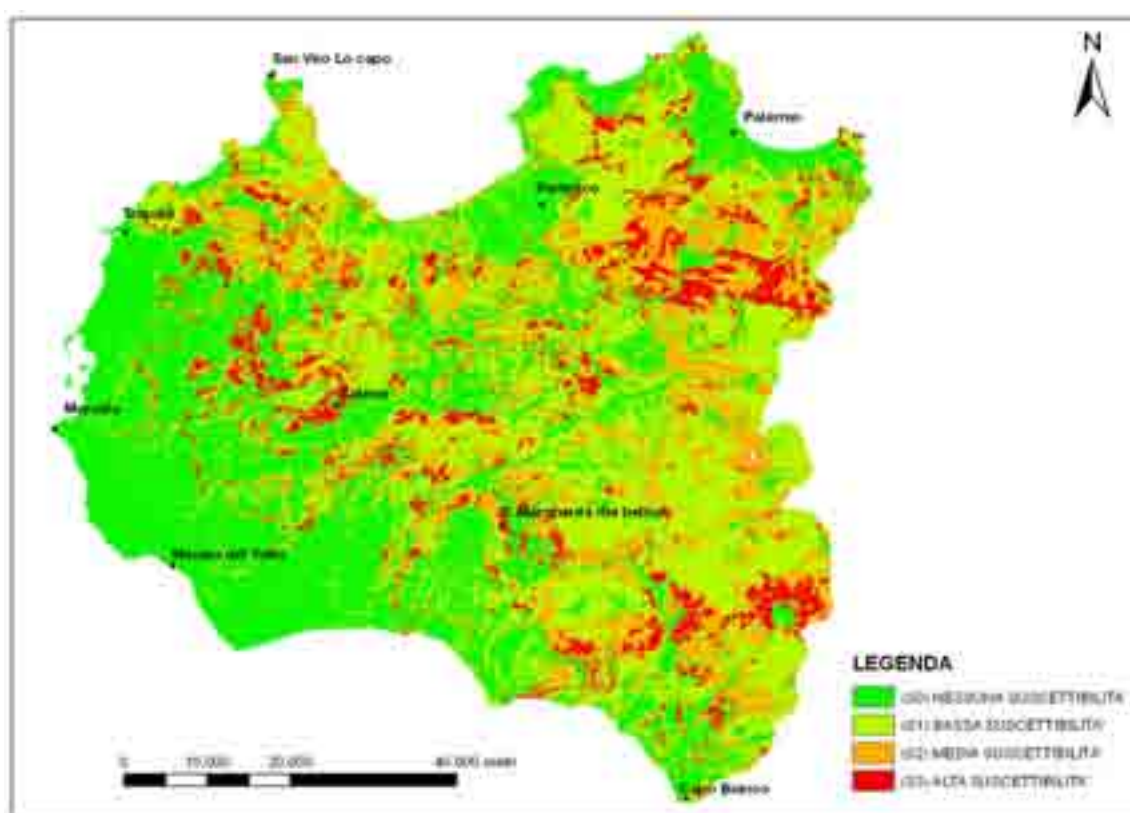


Figura 10.6: Carta di suscettibilità della Macroarea 2 (Val di Mazara)

Per quanto riguarda la validazione secondo il metodo della curva di ROC, come si evince nella figura 10.4 relativa al solo set di training, la curva che più si avvicina all'angolo superiore sinistro del diagramma e che sottende un'area maggiore è quella relativa al modello a cinque variabili; in questo caso i valori della curva sono uguali a 0.75, mentre per i modelli a tre e a quattro variabili il valore è leggermente inferiore, cioè 0.73. Per il dataset di validation (fig. 10.5) i valori più alti si hanno, anche in questo caso, con il modello a cinque variabili, pari a 0.82; mentre per i modelli a quattro e a tre variabili i valori calano

leggermente rispettivamente, essendo uguali a 0.80 e a 0.77. Nella figura 10.6 è mostrata la carta di suscettibilità per la macroarea 2 relativa al modello di regressione logistica a cinque variabili.

### 10.3 Macroarea 3 (Versante Tirrenico)

La macroarea 3 o Versante Tirrenico si estende per 2847.72  $Km^2$ . I rilievi maggiori sono attornati da vaste plaghe di argille ed arenarie che danno vita a colline e monti rotondeggianti od a creste allungate. I maggiori rilievi risultano generalmente circondati da terreni di natura terrigena e fluvio-deltizia (Formazione Cozzo Terravecchia) e subordinatamente da depositi ascrivibili al ciclo evaporitico messiniano ed ai “Trubi” pliocenici. La fascia costiera è caratterizzata dalla presenza di spianate terrazzate che dal livello del mare si elevano sino alla quota di circa 250 metri.

La quasi totalità dei corsi d’acqua è a carattere torrentizio, ad eccezione dell’Imera meridionale e settentrionale e della Fiumara di Pollina; con esclusione dell’area endoreica di Pizzo Carbonara, Monte Ferro, Monte Spina Puci, caratterizzata dall’assenza di rete idrografica superficiale, l’area mostra un drenaggio molto sviluppato in corrispondenza di depositi argillosi i quali ricoprono circa il 32% dell’area totale mentre il 36% è ricoperto da terreni arenaceo-argillosi.

Le zone montuose presenti ricadono nel settore settentrionale della catena nord siciliana e sono il risultato della sovrapposizione tettonica miocenica di vari corpi geologici carbonatici, carbonatico-silicoclastici e terrigeni (Trias sup.-Miocene inf.), con vergenza generalmente meridionale. Le falde tettoniche, che costituiscono il settore madonita della catena siciliana, hanno raggiunto gli attuali rapporti reciproci fra l’inizio del Miocene e l’inizio del Pliocene [87].

La carta di uso del suolo mostra una notevole presenza di zone a vegetazione arbustiva e/o erbacea (31%), di seminativi (25%) e in maniera minore di colture permanenti (17%).

Il dataset di frane a solo cinematisimo lento interessa un’area di circa 78  $km^2$  pari allo 2.7% dell’intera macroarea ed è costituito da 452 corpi di frana. Questo è stato suddiviso in due dataset distinti, uno di training con 345 frane e uno di validation con 107 frane. Da questi due dataset sono stati estrapolati i pixel relativi alle zone di scarpata dove dei 98800 pixel relativi alle zone di nicchia, solo 67999 sono stati utilizzati per addestrare il modello.

Le procedure di validazione, come al solito, sono state condotte sull'intero dataset di frane a cinematiso lento e sono state effettuate incrociando le frane mappate con la previsione ottenuta tramite il modello di regressione logistica. Nelle tabelle tetracoriche seguenti sono riassunte le percentuali di area in frana correttamente classificata (VP), di area non in frana correttamente classificata (VN), di area in frana erroneamente classificata (FN) e di area non in frana erroneamente classificata (FP) sia sul dataset di training che sul dataset di validation. Nella tabella 10.6 relativa al solo set di training, si nota come per la prima combinazione (Pendenza, Litologia e Uso del Suolo) il modello riesce a classificare correttamente il 72.38% di area effettivamente in frana e il 59.04% dell'area non in frana.

Numero Variabili	Tipo di Variabile Indipendente	VP (%)	VN (%)	FN (%)	FP (%)
3	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo	72.38	59.04	40.96	27.62
4	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number	81.78	64.26	35.74	18.22
5	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number + Indice di Anomalia Pluviometrica	81.88	63.97	36.03	18.12

**Tabella 10.6:** Tabella di Contingenza *Previsto-Osservato* sul dataset di training per la Macroarea 3

VP (Veri Positivi) aree previste instabili ed effettivamente osservate instabili; VN (Veri Negativi) aree previste stabili ed effettivamente osservate stabili; FN (Falsi Negativi) aree previste stabili ma osservate instabili; FP (Falsi Positivi) aree previste instabili ma osservate stabili.

In questo caso la percentuale cresce del 9.4% quando nel calcolo viene inserita la quarta variabile (Curve Number), si passa quindi all'81.78% di classificazione corretta per l'area in frana. La percentuale relativa all'area non in frana aumenta crescendo fino al 64.26%.

Numero Variabili	Tipo di Variabile Indipendente	VP (%)	VN (%)	FN (%)	FP (%)
3	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo	72.33	58.91	41.09	27.67
4	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number	83.47	64.07	35.93	16.53
5	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number + Indice di Anomalia Pluviometrica	83.47	63.78	36.22	16.53

**Tabella 10.7:** Tabella di Contingenza *Previsto-Osservato* sul dataset di validation per la Macroarea 3

VP (Veri Positivi) aree previste instabili ed effettivamente osservate instabili; VN (Veri Negativi) aree previste stabili ed effettivamente osservate stabili; FN (Falsi Negativi) aree previste stabili ma osservate instabili; FP (Falsi Positivi) aree previste instabili ma osservate stabili.

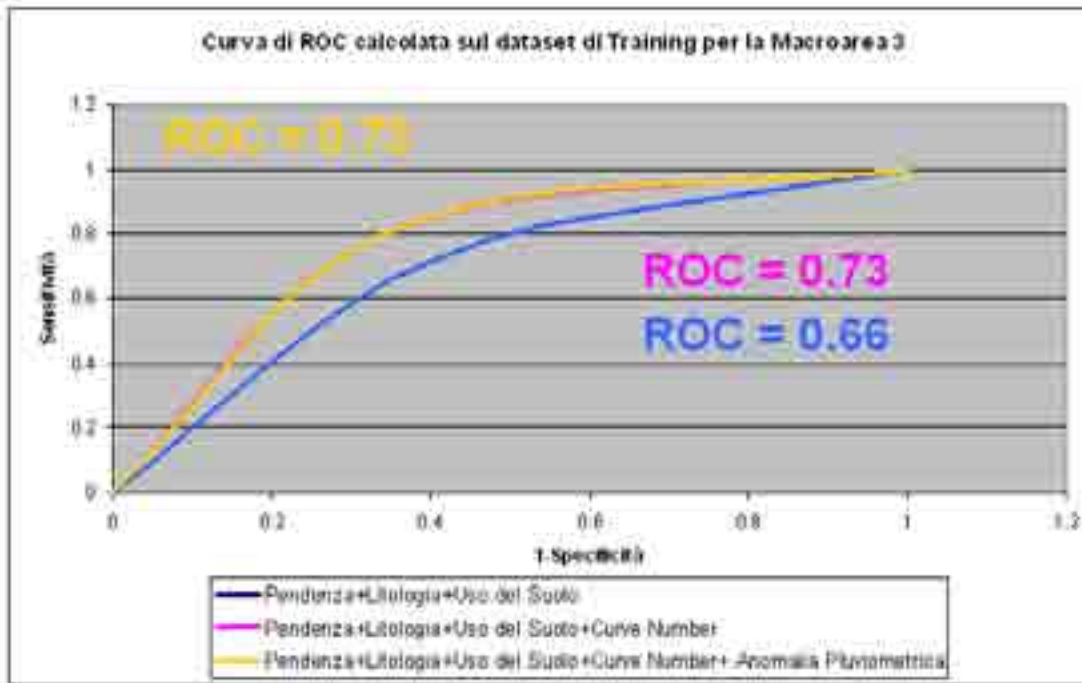


Figura 10.7: Curva di ROC calcolata sul dataset di training per la Macroarea 3

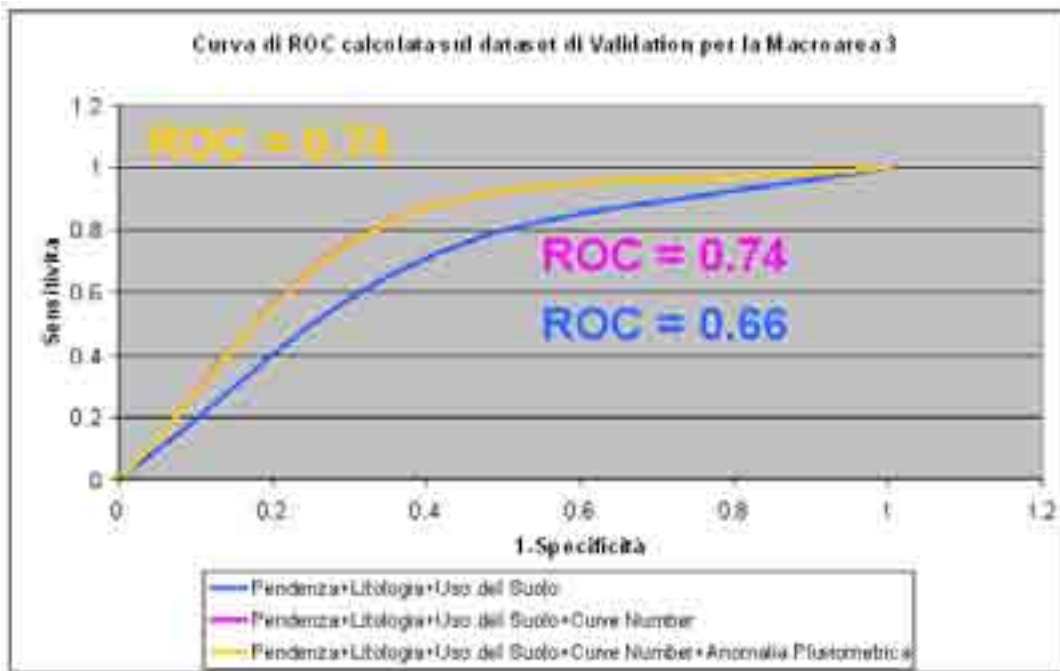


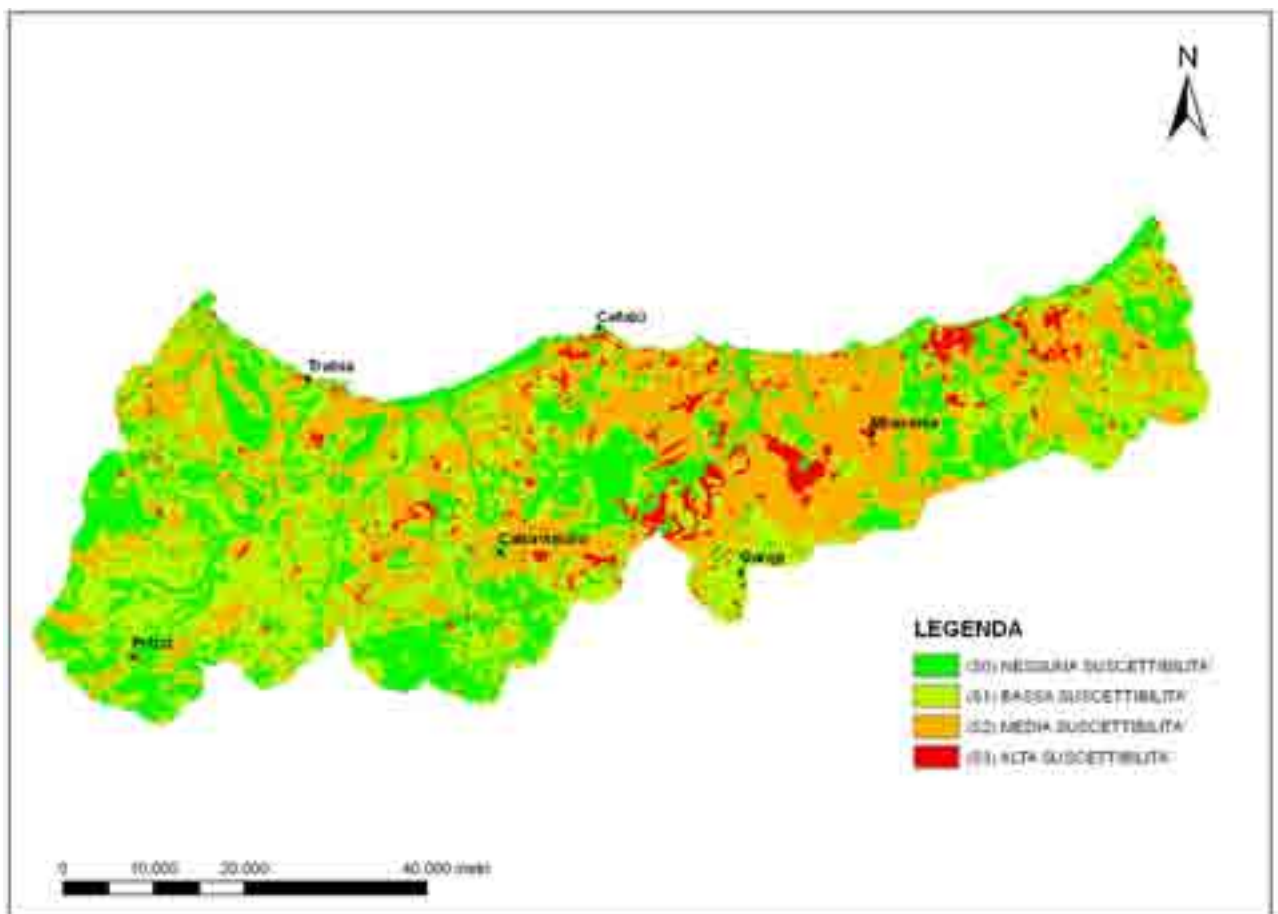
Figura 10.8: Curva di ROC calcolata sul dataset di validation per la Macroarea 3



L'introduzione della quinta variabile (l'Indice di Anomalia Pluviometrica) migliora di pochissimo la capacità passando all'81.88% di aree in frana classificate correttamente. La percentuale delle aree non in frana diminuisce leggermente fino al valore di 63.97%.

Nella tabella 10.7 relativa al solo set di validation, si nota come per la prima combinazione (Pendenza, Litologia e Uso del Suolo) il modello riesce a classificare correttamente il 72.33% di area effettivamente in frana e il 58.91% di area non in frana.

Le percentuali crescono vistosamente quando viene introdotta la quarta variabile (Curve Number), passando all'83.47% di classificazione corretta per l'area in frana, e al 64.07% per l'area non in frana. L'introduzione della quinta variabile (l'Indice di Anomalia Pluviometrica) non migliora la predizione né per le aree in frana né per le aree non in frana.



**Figura 10.9:** Carta di suscettibilità della Macroarea 3 (Versante Tirrenico)

Per quanto riguarda la validazione del set di training secondo il metodo della curva di

ROC, come si può notare nella figura 10.7 la curva che più si avvicina all'angolo superiore sinistro del diagramma e che sottende un'area maggiore è quella relativa ai modelli a quattro e a cinque variabili; in questo caso i valori della curva sono uguali a 0.73, mentre per il modello a tre variabili il valore si attesta sullo 0.66. Per il dataset di validation visibile in figura 10.8 i valori più alti della curva di ROC si hanno con i modelli a quattro e a cinque variabili pari a 0.74, mentre per il modello a tre variabili i valori sono pari a 0.66. Nella figura 10.9 è mostrata la carta di suscettibilità per la macroarea 3 relativa al modello di regressione logistica a cinque variabili.

## 10.4 Macroarea 4 (Bacino del Simeto)

La macroarea 4 o Bacino del Simeto ricade principalmente nel territorio delle provincie di Catania ed Enna, mentre interessa in misura minore il territorio della provincia di Messina, e solo marginalmente Siracusa, Caltanissetta e Palermo; essa si estende per 4305.80  $km^2$ . Il bacino, ricoprendo un'ampia porzione di territorio, presenta notevoli variazioni litologiche e strutturali. Geologicamente ricade tra i domini strutturali dell'Avampese Ibleo e della Catena Appenninico-Maghrebide ed è caratterizzato da terreni sedimentari e vulcanici strettamente associati. Il contrasto fra le aree montane e la vasta pianura di Catania è estremamente forte tanto che l'altitudine del bacino presenta un valore minimo pari a pochi metri sul livello del mare, un valore massimo di 3323 metri sul Monte Etna e un valore medio intorno ai 530 metri. La Piana di Catania è caratterizzata da ampie superfici e quote inferiori ai 100 metri e può essere considerata la più estesa delle pianure siciliane. La presenza dei fiumi Simeto, Dittaino e Giornalunga creano su quest'ultima una spessa copertura limoso-alluvionale recente, costituita prevalentemente da sabbie più o meno siltose e ghiaie sabbiose con ciottoli che sovrastano i terreni argilloso-sabbiosi pleistocenici poggianti sulle argille mioplioceniche. Questo tipo di copertura crea un paesaggio generalmente pianeggiante o sub-pianeggiante, interrotto verso Sud da forme più aspre, costituite da successioni di terreni calcarei ed eruttivi, che affiorano lungo una fascia orientata in direzione NE-SO. Un'ampia parte del bacino, pari al 45% dell'intera superficie, è ricoperta da terreni argillosi e marnosi di varia età, da alternanze flyschoidi a componente pelitica e da metamorfiti. Un'altra parte molto significativa del bacino, circa il 17% del totale, è interessata da terreni a media permeabilità rappresentati da depositi clastici di deposizione continentale; infine una parte pari al 14% dell'area è costituita dai prodotti originati dall'attività eruttiva dell'Et-

na e dai processi di disgregazione delle rocce vulcaniche che si impostano sopra i terreni sedimentari di natura flyschoidi. Sui terreni argillosi prevalgono soprattutto i seminativi con il 38% e le colture permanenti con il 16%, mentre le zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea ricoprono il 24% dell'area.

Il dataset di frane a solo cinematismo lento interessa un'area di circa 48  $km^2$  pari allo 1.1% dell'intera macroarea ed è costituito da 320 corpi di frana. Questo è stato suddiviso in due dataset distinti, uno di training con 209 frane e uno di validation con 111 frane. Da questi due dataset sono stati estrapolati i pixel relativi alle zone di scarpata, dove dei 57309 pixel relativi alle zone di nicchia o scarpata solo 38649 sono stati utilizzati per addestrare il modello. Le procedure di validazione, così come nelle macroaree precedenti, sono state condotte sull'intero dataset di frane e sono state effettuate incrociando le frane mappate con la previsione ottenuta tramite il modello di regressione logistica. Nelle tabelle tetracoriche seguenti sono riassunte le percentuali di area in frana correttamente classificata (VP), di area non in frana correttamente classificata (VN), di area in frana erroneamente classificata (FN) e di area non in frana erroneamente classificata (FP) sia sul dataset di training che sul dataset di validation. Nella tabella 10.8 relativa al solo set di training, si nota come per la prima combinazione (Pendenza, Litologia e Uso del Suolo) il modello riesce a classificare correttamente il 72.98% di area effettivamente in frana e il 90.05% dell'area non in frana. La percentuale di classificazione corretta cresce del 13.78% quando nel calcolo viene inserita la quarta variabile (Curve Number), si passa quindi all'86.75% per l'area in frana, mentre di contro la percentuale relativa all'area non in frana decresce dell'8.2% passando all'81.84%.

Numero Variabili	Tipo di Variabile Indipendente	VP (%)	VN (%)	FN (%)	FP (%)
3	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo	72.98	90.05	9.95	27.11
4	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number	86.75	81.84	18.16	13.25
5	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number + Indice di Anomalia Pluviometrica	84.43	85.94	14.06	15.57

**Tabella 10.8:** Tabella di Contingenza *Previsto-Osservato* sul dataset di training per la Macroarea 4  
 VP (Veri Positivi) aree previste instabili ed effettivamente osservate instabili; VN (Veri Negativi) aree previste stabili ed effettivamente osservate stabili; FN (Falsi Negativi) aree previste stabili ma osservate instabili; FP (Falsi Positivi) aree previste instabili ma osservate stabili.

L'introduzione della quinta variabile (l'Indice di Anomalia Pluviometrica) non migliora la capacità predittiva del modello ma anzi si nota un peggioramento passando all'84.43%

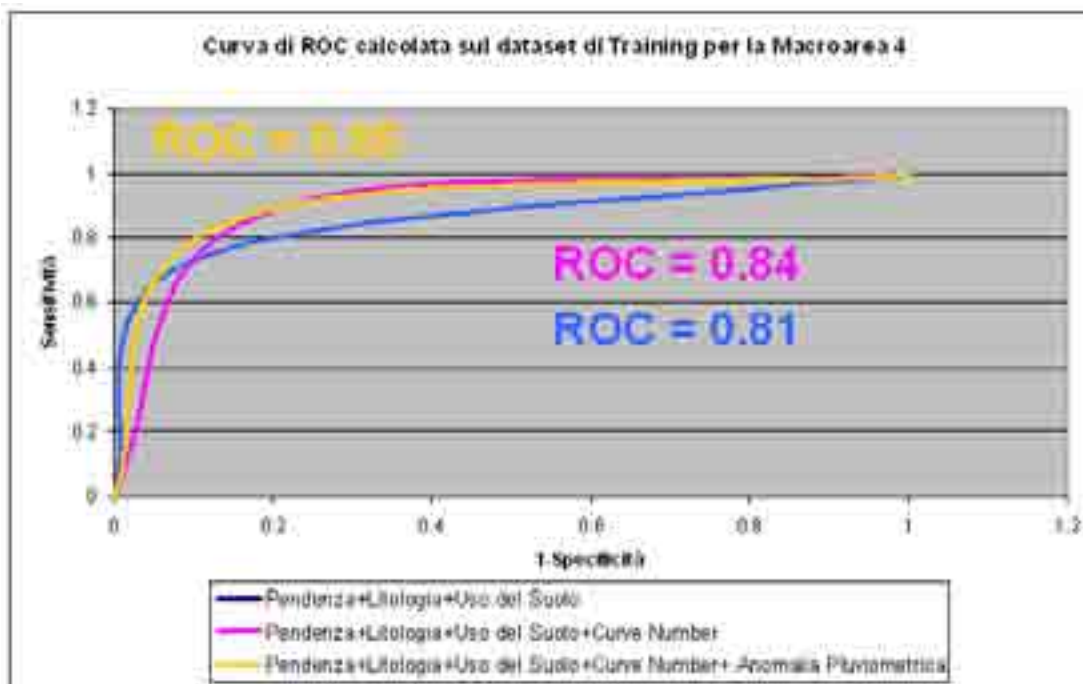
di aree in frana classificate correttamente. Invece la percentuale delle aree non in frana aumenta leggermente attestandosi all'85.94%.

Nella tabella 10.9 relativa al solo set di validation, si nota come per la prima combinazione (Pendenza, Litologia e Uso del Suolo) il modello riesce a classificare correttamente il 75.48% di area effettivamente in frana e l'89.95% di area non in frana.

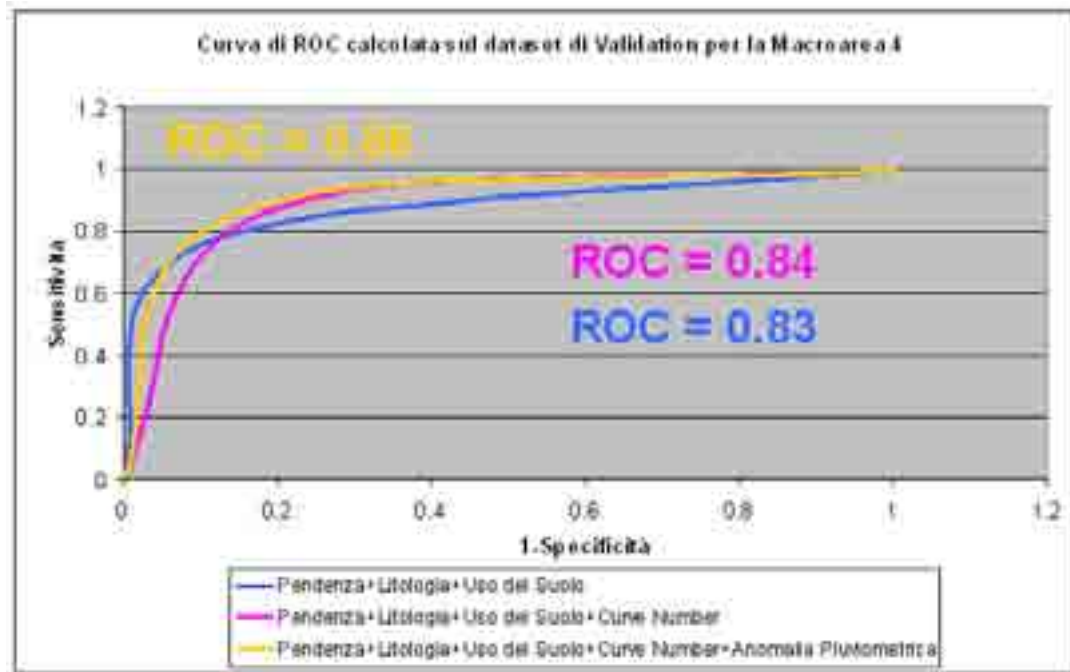
Numero Variabili	Tipo di Variabile Indipendente	VP (%)	VN (%)	FN (%)	FP (%)
3	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo	75.48	89.95	10.05	24.52
4	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number	85.97	81.73	18.27	14.03
5	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number + Indice di Anomalia Pluviometrica	85.30	85.83	14.17	14.70

**Tabella 10.9:** Tabella di Contingenza *Previsto-Osservato* sul dataset di validation per la Macroarea 4

VP (Veri Positivi) aree previste instabili ed effettivamente osservate instabili; VN (Veri Negativi) aree previste stabili ed effettivamente osservate stabili; FN (Falsi Negativi) aree previste stabili ma osservate instabili; FP (Falsi Positivi) aree previste instabili ma osservate stabili.



**Figura 10.10:** Curva di ROC calcolata sul dataset di training per la Macroarea 4



**Figura 10.11:** Curva di ROC calcolata sul dataset di validation per la Macroarea 4

Le percentuali di classificazione corretta per l'area in frana crescono vistosamente quando viene introdotta la quarta variabile (Curve Number) passando all'85.97%, ma scendono all'81.73% per quanto riguarda l'area non in frana. L'introduzione della quinta variabile (l'Indice di Anomalia Pluviometrica) non migliora la predizione per le aree in frana rimanendo su valori percentuali pressochè uguali al modello precedente, però migliora la previsione per le aree non in frana attestandosi sull'85.83%.

Per quanto riguarda la validazione del set di training secondo il metodo della curva di ROC, come si può notare nella figura 10.10 la curva che più si avvicina all'angolo superiore sinistro del diagramma e che sottende un'area maggiore è quella relativa al modello a cinque variabili; in questo caso i valori della curva sono uguali a 0.85, mentre per il modello a quattro variabili il valore è di 0.84 e per quello a tre il valore si attesta sullo 0.81. Anche per il dataset di validation visibile in figura 10.11 i valori più alti della curva di ROC si hanno con il modello a cinque variabili uguale a 0.86; mentre per i modelli a quattro e a tre variabili i valori sono rispettivamente uguali a 0.84 e 0.83. Nella figura 10.12 è mostrata la carta di suscettibilità per la macroarea 4 relativa al modello di regressione logistica a cinque variabili.

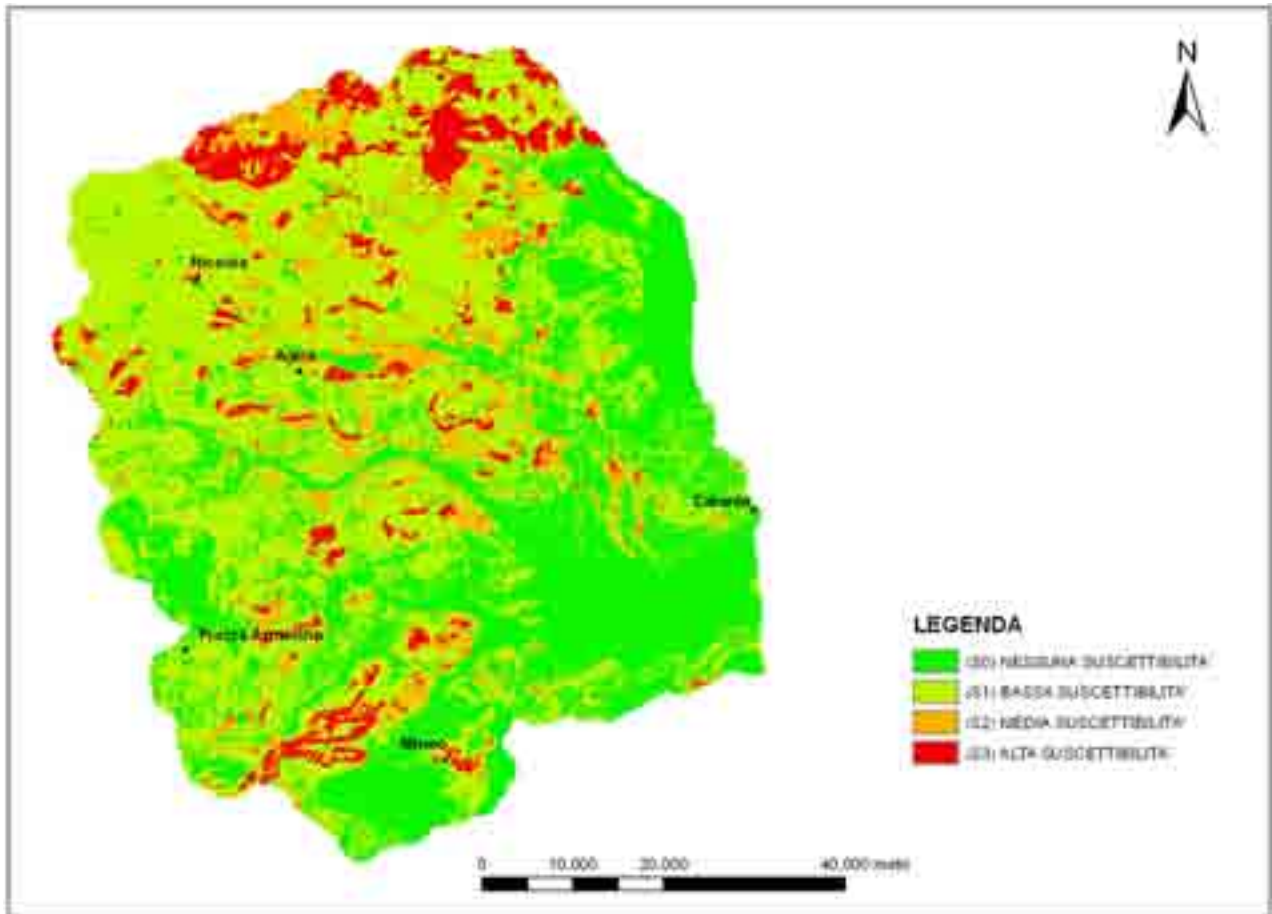


Figura 10.12: Carta di suscettibilità della Macroarea 4 (Bacino del Simeto)

## 10.5 Macroarea 5 (Monti Peloritani)

La macroarea 5 o Monti Peloritani ha un'estensione uguale a  $2937.80 \text{ km}^2$  ed è compresa tra la Piana di Messina, i Monti Peloritani Orientali e la regione Etnea. I terreni presenti nella Piana di Messina sono costituiti per la maggior parte da depositi ghiaioso-sabbiosi a luoghi ricoperti da depositi alluvionali recenti. Questi si presentano sub-pianeggianti, degradando con debolissime pendenze verso l'attuale linea di costa. L'area di raccordo tra la piana costiera e le aree a gradiente topografico più elevato è marcata da un locale alto morfologico, rappresentato da paleoconoidi alluvionali. Lungo la catena dei Peloritani si trovano i rilievi oltre i 1000 metri d'altezza i quali degradano verso le coste ionica e tirrenica fino a raggiungere quote di 400-500 metri. I terreni presenti sono costituiti in prevalenza

da successioni filladico-metamorfiche per circa il 28% e da terreni arenaceo-argillosi per il 22% dell'area totale.

La regione etnea è rappresentata principalmente dal Monte Etna il quale costituisce un'unità territoriale del tutto tipica e differenziata dagli ambienti circostanti per condizioni geografiche, morfologiche, climatiche e geologiche. La sua imponenza non è dovuta soltanto alle dimensioni dell'apparato vulcanico ma anche alla morfologia del substrato sedimentario sul quale si appoggia e che sotto il vulcano raggiunge quote superiori a 1000 metri. L'area può essere divisa schematicamente in tre fasce situate a quote differenti in funzione delle caratteristiche morfologiche e climatiche:

1. la "*fascia pedemontana*" che si estende dal livello del mare fino a quota 600 metri, caratterizzata da pendii abbastanza dolci e talora interrotti da superfici sub-pianeggianti.
2. la "*zona boschiva*" estesa da quota 600 a quota 2000 metri, risulta caratterizzata da pendii più accentuati con frequenti bruschi dislivelli.
3. la "*regione desertica*" comprendente le quote più elevate fino alla sommità del cono vulcanico, caratterizzata da pendii molto ripidi che culminano in maniera concentrica nel cratere centrale.

A causa della presenza dell'Etna il 24% della macroarea è costituita da lave consolidate sopra le quali non si imposta un vero sistema idrografico superficiale a causa dell'elevato coefficiente di infiltrazione delle rocce vulcaniche molto permeabili per fessurazione. Lungo tali terreni i deflussi superficiali si verificano solo occasionalmente e in relazione a piogge di forte intensità e di lunga durata, e comunque lungo incisioni poco evidenti presenti sui bassi versanti del vulcano.

La carta di uso del suolo evidenzia una forte presenza di zone a vegetazione arbustiva e/o erbacea (32%), di colture permanenti (22%) e in maniera inferiore di zone boscate (17%).

Il dataset di frane a solo cinematisimo lento interessa un'area di circa 47  $km^2$  pari allo 1.6% dell'intera macroarea ed è costituito da 534 corpi di frana. Questo è stato suddiviso in due dataset distinti, uno di training con 427 frane e uno di validation con 107 frane. Da questi due dataset sono stati estrapolati i pixel relativi alle zone di scarpata, dove dei 61072 pixel relativi alle zone di nicchia solo 44325 sono stati utilizzati per addestrare il modello.

Le procedure di validazione sono state condotte anche in quest'area sull'intero dataset di frane e sono state effettuate incrociando le frane mappate con la previsione ottenuta tra-

mite il modello di regressione logistica. Nelle tabelle di contingenza seguenti sono riassunte le percentuali di area in frana correttamente classificata (VP), di area non in frana correttamente classificata (VN), di area in frana erroneamente classificata (FN) e di area non in frana erroneamente classificata (FP) sia sul dataset di training che sul dataset di validation. Nella tabella 10.10 relativa al set di training sono espresse le percentuali di classificazione corretta relative al modello a tre, a quattro e a cinque variabili.

Numero Variabili	Tipo di Variabile Indipendente	VP (%)	VN (%)	FN (%)	FP (%)
3	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo	72.89	79.83	20.17	27.11
4	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number	85.39	71.45	28.55	14.61
5	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number + Indice di Anomalia Pluviometrica	85.64	70.57	29.43	14.36

**Tabella 10.10:** Tabella di Contingenza *Previsto-Osservato* sul dataset di training per la Macroarea 5

VP (Veri Positivi) aree previste instabili ed effettivamente osservate instabili; VN (Veri Negativi) aree previste stabili ed effettivamente osservate stabili; FN (Falsi Negativi) aree previste stabili ma osservate instabili; FP (Falsi Positivi) aree previste instabili ma osservate stabili.

Numero Variabili	Tipo di Variabile Indipendente	VP (%)	VN (%)	FN (%)	FP (%)
3	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo	86.49	79.68	20.32	13.51
4	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number	94.15	71.27	28.73	5.85
5	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number + Indice di Anomalia Pluviometrica	95.09	70.40	29.60	4.91

**Tabella 10.11:** Tabella di Contingenza *Previsto-Osservato* sul dataset di validation per la Macroarea 5

VP (Veri Positivi) aree previste instabili ed effettivamente osservate instabili; VN (Veri Negativi) aree previste stabili ed effettivamente osservate stabili; FN (Falsi Negativi) aree previste stabili ma osservate instabili; FP (Falsi Positivi) aree previste instabili ma osservate stabili.

Nel modello a tre variabili (Pendenza, Litologia e Uso del Suolo) la classificazione corretta di area in frana è il 72.98% mentre per l'area non in frana è il 79.83%. Quando nel modello viene aggiunta la quarta variabile (Curve Number) si ha un miglioramento nelle percentuali relative all'area in frana con valori di classificazione corretta che si attestano



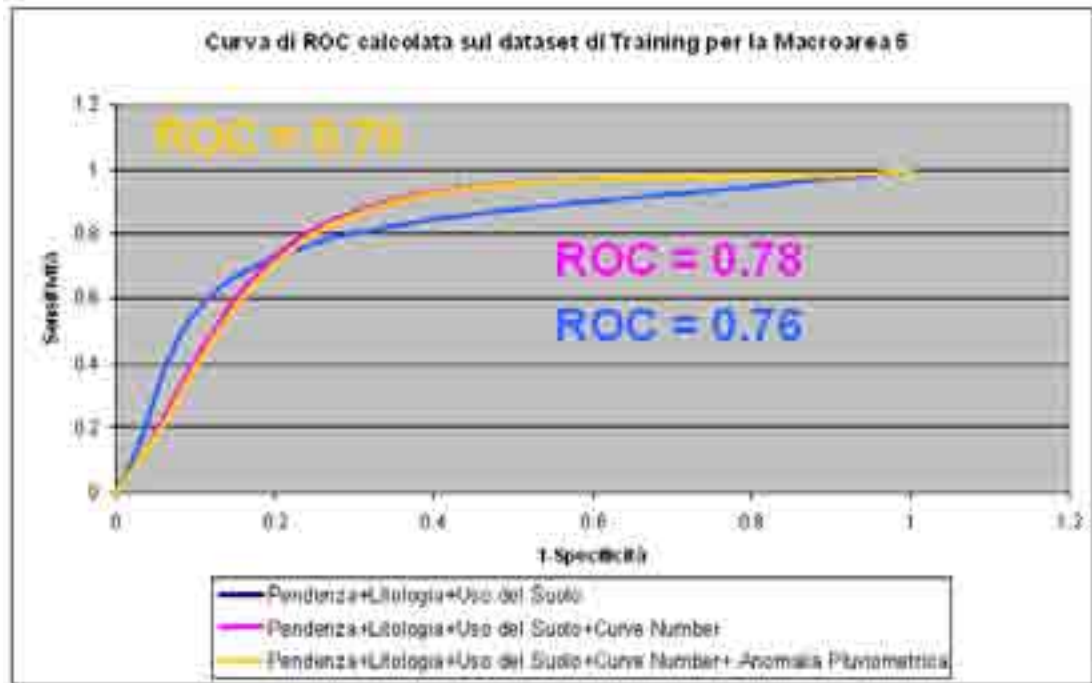


Figura 10.13: Curva di ROC calcolata sul dataset di training per la Macroarea 5

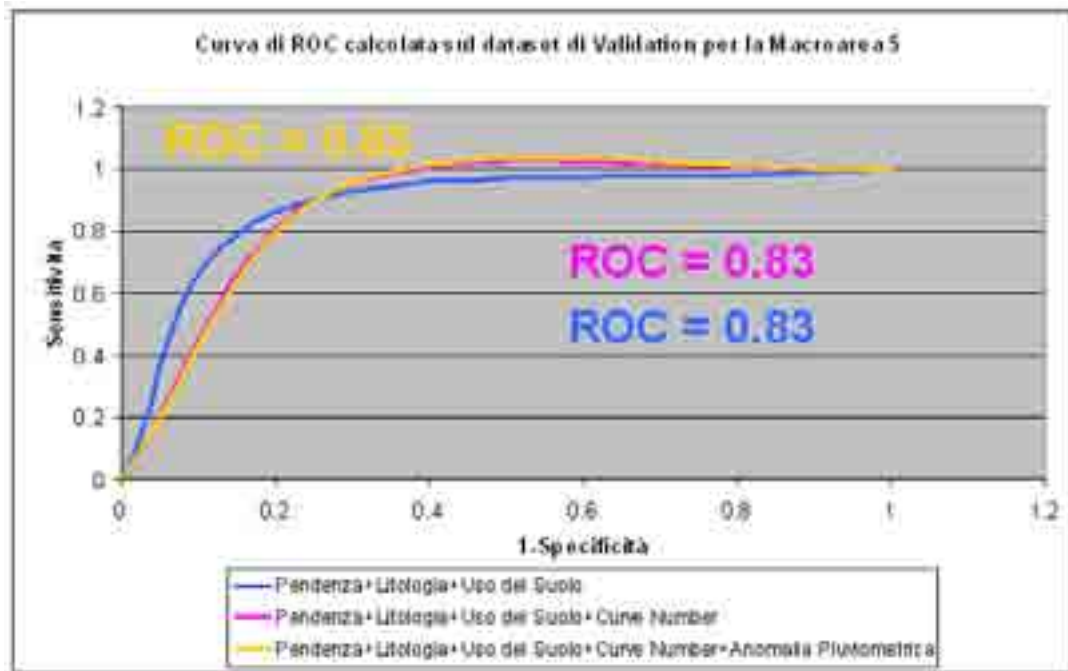
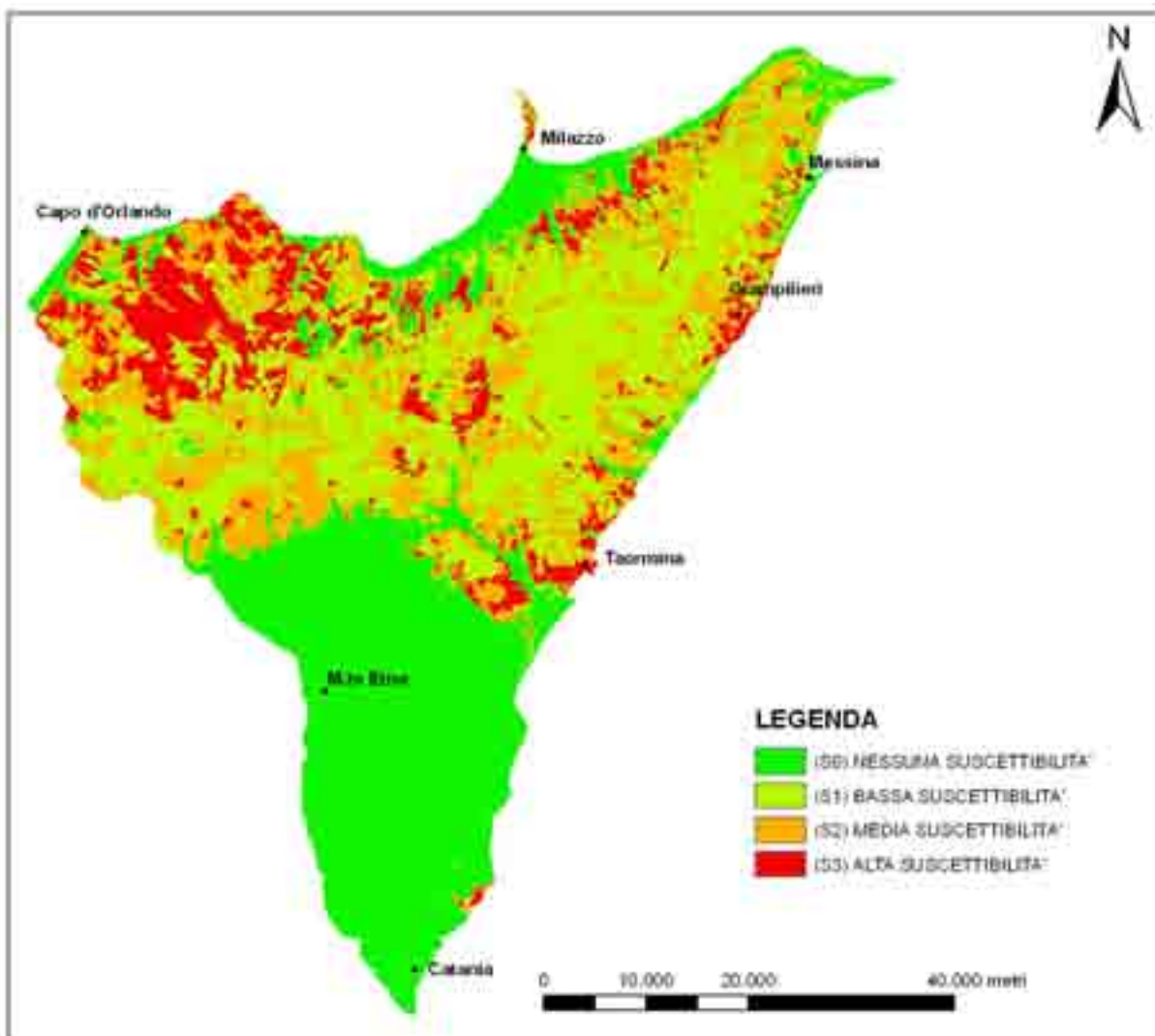


Figura 10.14: Curva di ROC calcolata sul dataset di validation per la Macroarea 5

sull' 85.39%; di contro invece si ha un peggioramento per quanto riguarda l'area non in frana con un calo di circa 8% passando così al 71.45%. L'introduzione della quinta variabile (l'Indice di Anomalia Pluviometrica) migliora di pochissimo la capacità predittiva del modello passando all'85.64% di aree in frana classificate correttamente, mentre peggiora leggermente la classificazione corretta delle aree non in frana calando al 70.57%.



**Figura 10.15:** Carta di suscettibilità della Macroarea 5 (Monti Peloritani)

Nella tabella 10.11 relativa al solo set di validation, la prima combinazione (Pendenza, Litologia e Uso del Suolo) classifica correttamente l'86.49% di area effettivamente in frana e il 79.68% di area non in frana. La capacità predittiva del modello migliora, anche in

questo caso, con l'introduzione della quarta variabile (Curve Number) passando al 94.15% di classificazione corretta per l'area in frana, mentre diminuisce al 71.27% per l'area non in frana. L'introduzione della quinta variabile (l'Indice di Anomalia Pluviometrica) migliora leggermente la predizione per le aree in frana passando al 95.09%, però peggiora leggermente la previsione per le aree non in frana calando al 70.40%.

Per quanto riguarda la validazione secondo il metodo della curva di ROC, come è mostrato nella figura 10.13, che riguarda il solo set di training, la curva che più si avvicina all'angolo superiore sinistro del diagramma e che sottende un'area maggiore è quella relativa al modello a quattro e a cinque variabili; in questo caso i valori della curva sono uguali a 0.78, mentre per il modello a tre variabili il valore è leggermente inferiore è uguale a 0.76. Per il dataset di validation visibile in figura 10.14 tutti e tre i tipi di modello presentano lo stesso valore uguale a 0.83. Nella figura 10.15 è mostrata la carta di suscettibilità per la macroarea 5 relativa al modello di regressione logistica a cinque variabili.

## 10.6 Macroarea 6 (Val di Noto)

La macroarea 6 o Val di Noto presenta un'estensione pari a 4252.04  $km^2$  ed occupa l'estremità sud-orientale della Sicilia. Dal punto di vista morfologico la maggior parte dell'area è costituita da un altipiano che a partire da quota 1000 metri in corrispondenza dei rilievi basaltici di Monte Lauro va gradualmente a degradare verso Sud e verso Est fino al livello del mare. Il suddetto plateau, prevalentemente carbonatico, risulta profondamente inciso da una rete dendritica di valli che drenano il deflusso superficiale nel settore sud-occidentale verso sud con recapito nel Mare Mediterraneo e nel settore settentrionale e orientale verso Est con recapito nel Mare Ionio. Morfologie di bassopiano con altitudini fra 100 e 200 metri si hanno nel settore occidentale in corrispondenza della piana Comiso–Vittoria–Acate. Le valli o cave incise nella serie carbonatica miocenica, presentano particolari morfologie fluvio-carsiche, queste si manifestano sui versanti sia con morfologie superficiali tipo karren sia con condotti carsici fossili a vari livelli. Sui fondovalle sono presenti inghiottitoi sepolti al di sotto del materiale alluvionale. Dal punto di vista geologico-strutturale l'area dei Monti Iblei costituisce il settore più settentrionale dell'avampaese africano che verso Nord e Nord-Ovest va a formare l'avanfossa e al di là della congiungente Gela-Catania sparisce al di sotto delle coltri della falda di Gela. Insieme alle aree sommerse questo settore dell'avampaese fa parte del Blocco Pelagiano che costituisce, nel complesso, una zona

stabile estesa dalla Scarpata Ibleo-Maltese fino alla Tunisia, formata da una potente successione mesocenozoica prevalentemente carbonatica con ripetute intercalazioni di vulcaniti basiche. I terreni carbonatici ricoprono il 38% dell'area, mentre per il 23% sono presenti terreni sabbioso-calcarenitici e per il restante 14% terreni argillosi. La carta di uso del suolo mostra la presenza di terreni a seminativi per il 32% mentre le colture permanenti ricoprono il 21% dei terreni così come le zone a vegetazione arbustiva e/o erbacea.

Il dataset di frane a solo cinematisimo lento presente in quest'area è sicuramente il più povero tra i dataset utilizzati nel modello, infatti interessa un'area di circa  $7 \text{ km}^2$  pari allo 0.1% dell'intera macroarea ed è costituito da 51 corpi di frana. Questo è stato suddiviso in due dataset distinti, uno di training con 39 frane e uno di validation con 12 frane. Da questi due dataset sono stati estrapolati i pixel relativi alle zone di scarpata, dove dei 8494 pixel relativi alle zone di nicchia, solo 3199 sono stati utilizzati per addestrare il modello.

Come sempre le procedure di validazione sono state condotte sull'intero dataset di frane e sono state effettuate incrociando le frane mappate con la previsione ottenuta tramite il modello di regressione logistica. Nelle tabelle di contingenza seguenti sono riassunte le percentuali di area in frana correttamente classificata (VP), di area non in frana correttamente classificata (VN), di area in frana erroneamente classificata (FN) e di area non in frana erroneamente classificata (FP) sia sul dataset di training che sul dataset di validation. Nella tabella 10.12 relativa al set di training sono espresse le percentuali di classificazione corretta relative al modello a tre, a quattro e a cinque variabili.

Numero Variabili	Tipo di Variabile Indipendente	VP (%)	VN (%)	FN (%)	FP (%)
3	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo	71.40	92.62	7.38	28.60
4	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number	82.59	94.17	5.83	17.41
5	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number + Indice di Anomalia Pluviometrica	79.49	94.61	5.39	20.51

**Tabella 10.12:** Tabella di Contingenza *Previsto-Osservato* sul dataset di training per la Macroarea 6

VP (Veri Positivi) aree previste instabili ed effettivamente osservate instabili; VN (Veri Negativi) aree previste stabili ed effettivamente osservate stabili; FN (Falsi Negativi) aree previste stabili ma osservate instabili; FP (Falsi Positivi) aree previste instabili ma osservate stabili.

Per quanto riguarda il modello a tre variabili (Pendenza, Litologia e Uso del Suolo) viene classificato correttamente il 71.40% di area in frana mentre per l'area non in frana il 92.69%. Quando nel modello viene aggiunta la quarta variabile (Curve Number) si ha

un notevole miglioramento nelle percentuali di classificazione corretta sia delle aree in frana che delle aree non in frana rispettivamente con valori uguali all'82.59% e al 94.17%. L'introduzione della quinta variabile (l'Indice di Anomalia Pluviometrica) peggiora la capacità predittiva delle aree in frana scendendo al 79.49% di classificazione corretta, mentre migliora leggermente la classificazione delle aree non in frana passando al 94.61%.

Nella tabella 10.13 relativa al solo set di validation, la prima combinazione (Pendenza, Litologia e Uso del Suolo) classifica correttamente il 55.56% di area effettivamente in frana e il 92.63% di area non in frana. La capacità predittiva del modello migliora con l'introduzione della quarta variabile (Curve Number) passando al 63.47% di classificazione corretta per l'area in frana e al 94.17 per l'area non in frana. L'introduzione della quinta variabile (l'Indice di Anomalia Pluviometrica) migliora leggermente la predizione sia per le aree in frana che per le aree non in frana passando rispettivamente al 65.53% e al 94.61%.

Numero Variabili	Tipo di Variabile Indipendente	VP (%)	VN (%)	FN (%)	FP (%)
3	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo	55.56	92.63	7.37	44.44
4	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number	63.47	94.17	5.83	36.53
5	Pendenza + Litologia + Uso del Suolo + Curve Number + Indice di Anomalia Pluviometrica	65.53	94.61	5.39	34.47

**Tabella 10.13:** Tabella di Contingenza *Previsto-Osservato* sul dataset di validation per la Macroarea 6  
VP (Veri Positivi) aree previste instabili ed effettivamente osservate instabili; VN (Veri Negativi) aree previste stabili ed effettivamente osservate stabili; FN (Falsi Negativi) aree previste stabili ma osservate instabili; FP (Falsi Positivi) aree previste instabili ma osservate stabili.

Per quanto riguarda la validazione secondo il metodo della curva di ROC, come è mostrato nella figura 10.16, riguardante il set di training, la curva che più si avvicina all'angolo superiore sinistro del diagramma e che sottende un'area maggiore è quella relativa al modello a quattro variabili; in questo caso i valori della curva sono uguali a 0.88, mentre per il modello a cinque variabili sono di 0.87 e per quello a tre variabili i valori sono uguali a 0.82. Per il dataset di validation visibile in figura 10.17 i valori della curva di ROC crescono passando dallo 0.74 del modello a tre variabili a 0.79 per quello a quattro variabili sino allo 0.80 per il modello a cinque variabili. Nella figura 10.18 è mostrata la carta di suscettibilità per la macroarea 6 relativa al modello di regressione logistica a cinque variabili.

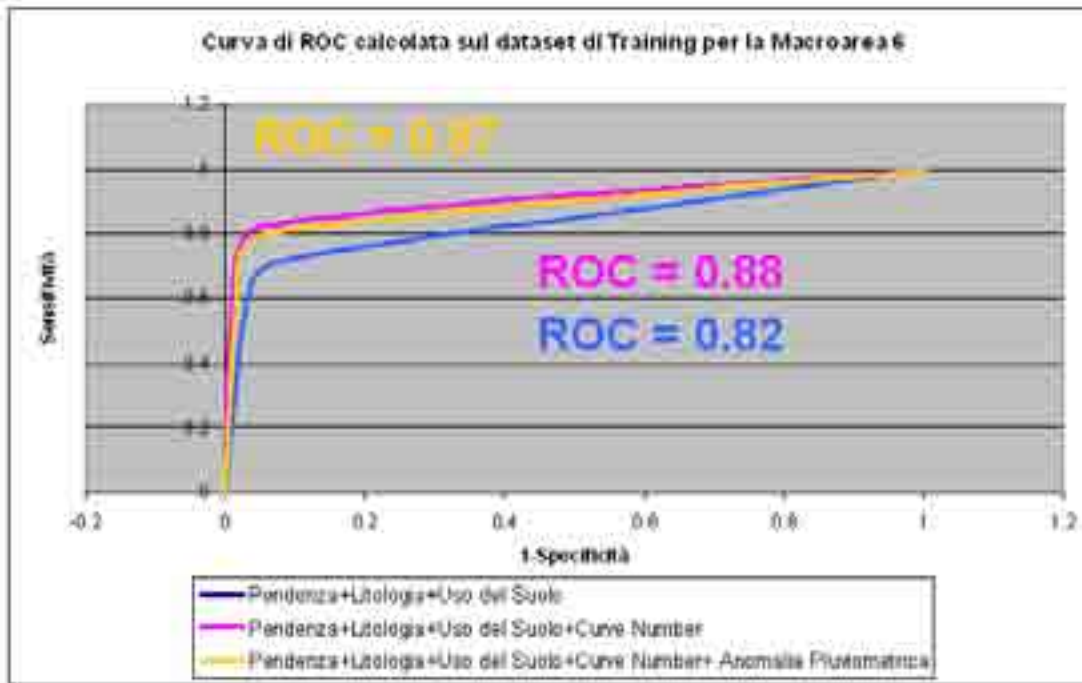


Figura 10.16: Curva di ROC calcolata sul dataset di training per la Macroarea 6

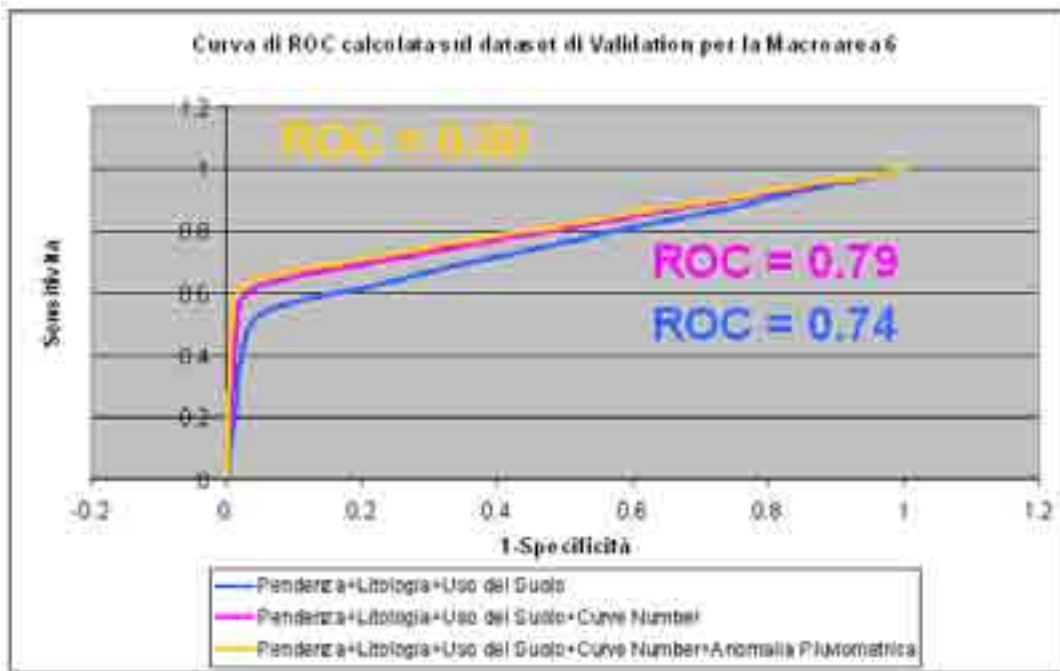
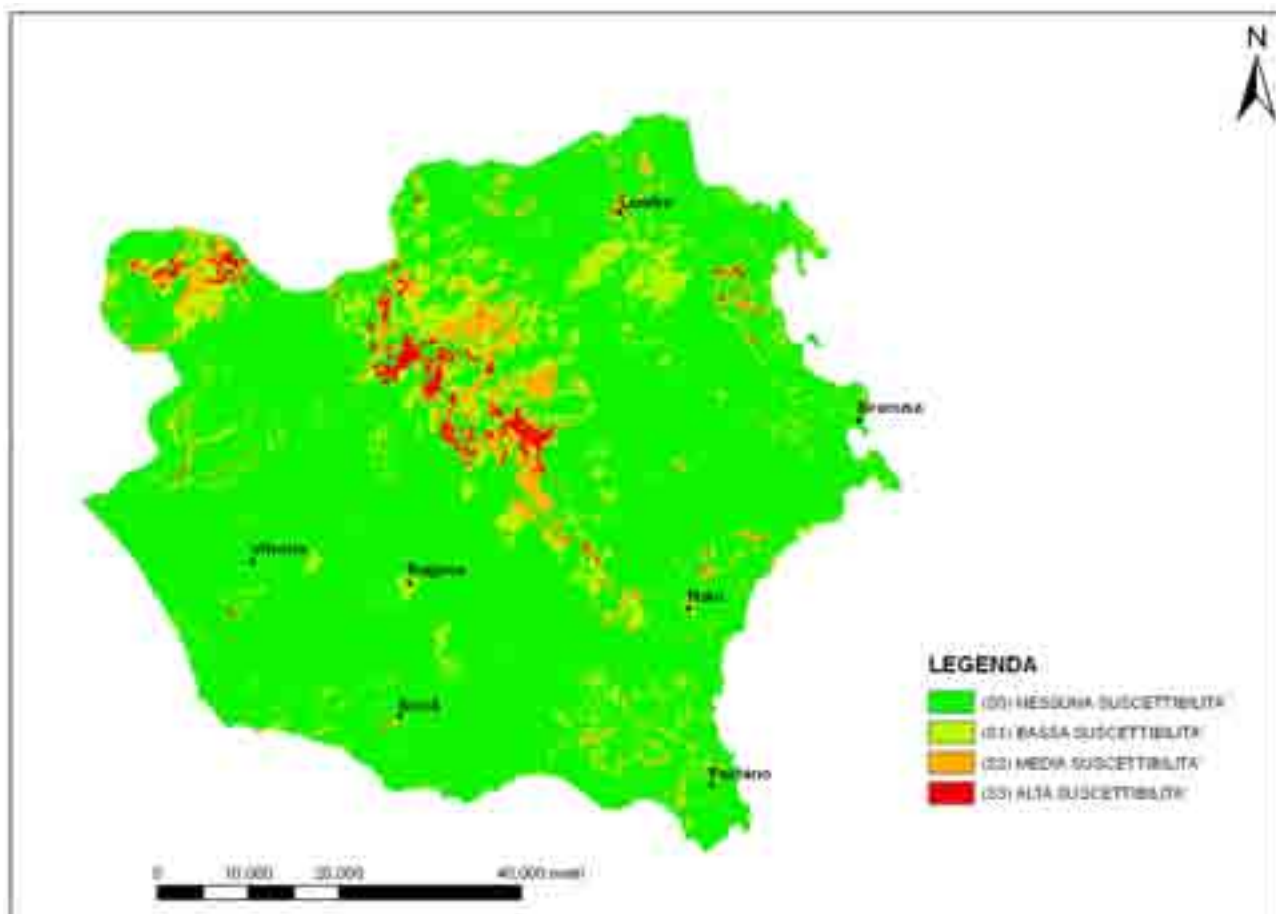
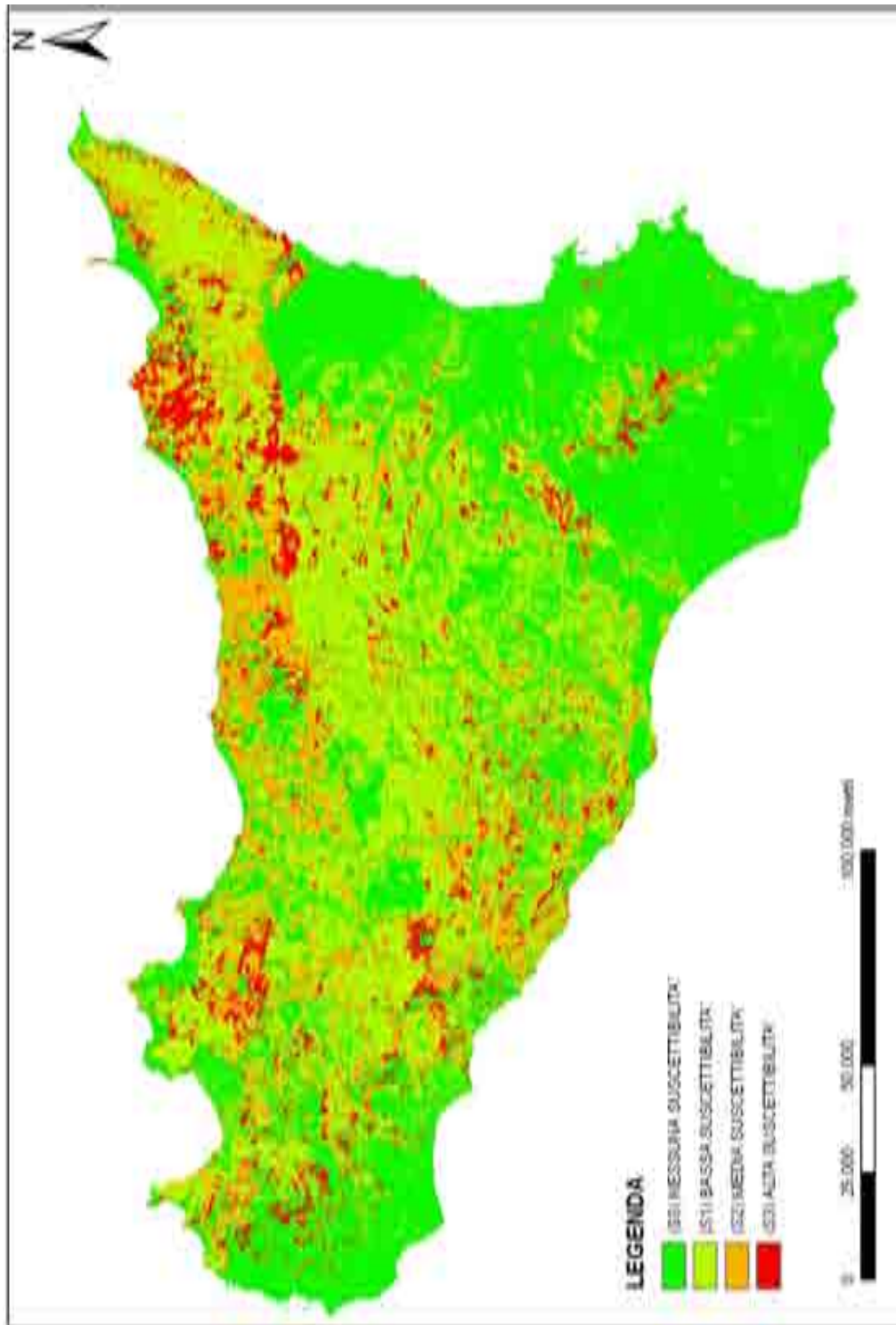


Figura 10.17: Curva di ROC calcolata sul dataset di validation per la Macroarea 6



**Figura 10.18:** Carta di suscettibilità della Macroarea 6 (Val di Noto)





**Figura 10.19:** Carta di suscettibilità della regione Sicilia ottenuta dal modello a 5 variabili



# Capitolo 11

## Conclusioni

Il lavoro di tesi ha avuto come obiettivo l'analisi della suscettibilità al rischio da frana della regione Sicilia, la quale ricopre una superficie di 25.428 km<sup>2</sup>. La ricerca è stata articolata in più fasi. Una prima fase è stata rivolta allo studio e alla ricerca della vasta letteratura presente, con l'obiettivo di scegliere la migliore metodologia applicativa in questo campo nonché verificarne le potenzialità e i limiti. Una seconda fase è stata incentrata sull'acquisizione di dati pregressi e sulla loro validazione e relativa omogeneizzazione (data la provenienza da fonti diverse) sia da un punto di vista geografico (anche in funzione di un'eventuale estensione della metodologia a scala nazionale) che topologico secondo le specifiche della direttiva europea INSPIRE. Una successiva analisi statistica dei parametri ambientali (litologia e uso del suolo), morfometrici (pendenza) e idrologici (curve number), è stata finalizzata alla descrizione delle relazioni di questi parametri con la franosità dell'area ed alla classificazione dei parametri scelti in intervalli significativi per il calcolo della suscettibilità. In questa fase inoltre è stata effettuata un'analisi pluviometrica dell'intera regione su dati di pioggia trentennali per la creazione di un indice di Anomalia Pluviometrica, in grado di parametrizzare il dato pluviometrico come tendenza statistica ad eventi di tipo "*favorevole*" all'innesco di fenomeni franosi. Una terza fase è stata dedicata alla scrittura e alla modifica di uno specifico codice di calcolo in linguaggio Python e C++ per l'implementazione all'interno di software GIS di un applicativo basato sulla statistica multivariata per la stima della suscettibilità al rischio da frana. Una quarta ed ultima fase ha riguardato la produzione di una mappa finale di suscettibilità con relativa validazione tramite tecniche e metodologie avanzate (ROC curve e Tabelle di Contingenza Previsto-Osservato).

Una doverosa considerazione va fatta sulle frane a cinematica lenta, che rappresentano la tipologia di dissesti utilizzati nel presente lavoro e che interessano i versanti argillosi dell'intero territorio siciliano. Queste sono, per numero di eventi, i più frequenti e diffusi dissesti censiti dall'archivio IFFI. Le dimensioni areali risultano quasi sempre limitate entro i 50 ha, gli spessori della massa coinvolta non sono quasi mai superiori ai 5 metri (generalmente entro 1-2 metri) e per la maggior parte si impostano in presenza di elevato degrado dei suoli.

La litologia prevalente è costituita da terreni pseudocoerenti di tipo flyschoidi sia pelitiche che arenacee, racchiusi nelle classi litologiche denominate *complesso argilloso* e *complesso arenaceo-argilloso*, comprendenti tutte le formazioni prevalentemente argillose del territorio, quali le argille pleistoceniche, le argille azzurre medio-plioceniche, le marne a foraminiferi del Pliocene inferiore, le formazioni argillose e marnose del Miocene medio-superiore, le litofacies pelitiche dei depositi di Flysch, le argille brecciate e le argille varicolori. Questi due complessi litologici ricoprono circa 11000 km<sup>2</sup>, che costituiscono il 43% dell'area totale. Indici di franosità elevati si riscontrano proprio in corrispondenza di queste classi litologiche, anche se indici di franosità altrettanto significativi sono stati riscontrati anche nel complesso evaporitico. Il complesso evaporitico ricopre quasi il 5% dell'area totale presentandosi con rocce gessose macrocristalline in livelli di spessore variabile, quasi mai puri, ma spesso associati ad intercalazioni argillose depositatesi in origine in zone a forte evaporazione. Questa forte componente argillosa potrebbe essere il fattore responsabile dell'alto valore percentuale di indice di franosità presente in questa classe. Per quanto riguarda la copertura del suolo, le classi che presentano indici di franosità elevati e che insieme occupano circa il 45% dell'area totale, cioè circa 11500 km<sup>2</sup>, sono i seminativi e le colture permanenti impostatisi nelle zone pianeggianti o collinari, comunque con pendenze mai superiori a 18°. Indici di franosità elevati sono evidenti anche nelle zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea e nelle zone boscate, presenti soprattutto nelle aree montano-collinari, le quali ricoprono 5500 km<sup>2</sup>, cioè circa il 22% dell'area totale. Gli andamenti degli indici di franosità di litologia e uso del suolo al variare della pendenza mostrano spiccate similitudini; in entrambi i casi i valori di picco sono compresi nell'intervallo 5°-18°, a conferma della forte influenza della pendenza sulla franosità e della prevalenza di fenomeni di riattivazione a cinematica lenta. Una considerazione a parte va fatta per il parametro idrologico utilizzato (Curve Number) e per l'indice di Anomalia Pluviometrica. Per quanto riguarda il Curve Number, le analisi statistiche indicano che i valori maggiormente significativi di indice di franosità si hanno per le classi comprese tra 76-98,

cioè una situazione tipo di una superficie impermeabile e quindi estremamente favorevole al ruscellamento; il risultato è confermato dal fatto che tali valori si impostano su terreni prevalentemente argillosi. L'indice di Anomalia Pluviometrica è stato ottenuto dall'elaborazione di dati provenienti da 78 stazioni termo-pluviometriche e compresi in un intervallo di tempo che va dal 1924 al 1995. Al fine di individuare quelle aree in cui le precipitazioni brevi e intense sono predominanti, soggette quindi, a parità di condizioni geo-litologiche, a maggiore suscettibilità al rischio da frana, sono state elaborate le distribuzioni di frequenza del valore medio dell'indice di Anomalia Pluviometrica all'interno sia delle aree in frana che delle aree considerate (nell'archivio IFFI) non in frana. Uno dei risultati più interessanti è stato constatare come le curve di distribuzione di frequenza per le aree in frana si concentrano principalmente nelle prime ore di pioggia, mentre per le aree non in frana si distribuiscono uniformemente nelle ventiquattro ore.

La scelta del tipo di approccio da seguire per il calcolo di suscettibilità ha tenuto conto del tipo di dissesti oggetto dell'analisi e della scala di studio. Nel presente lavoro è stato utilizzato un modello statistico lineare generalizzato (GLM) su base multivariata, in grado di valutare la propensione al dissesto dei versanti attraverso lo studio di quei fattori (sopra esposti) che si presume siano correlati con i fenomeni di instabilità. D'altro canto, modelli di tipo fisicamente basati avrebbero richiesto una caratterizzazione geotecnica ed idrogeologica continua e completa su tutto il territorio d'indagine, difficilmente realizzabile per un'area vasta come la regione Sicilia. Il modello sviluppato soddisfa al tempo stesso criteri di scientificità, applicabilità, trasparenza, ripetibilità, aggiornabilità ed esportabilità; si presta inoltre ad un utilizzo dinamico basato sull'aggiornamento e/o l'inserimento di nuovi dati.

Data la notevole estensione dell'area di studio, la mappa di suscettibilità finale non ha la pretesa di essere uno strumento di riferimento per scelte pianificatorie di tipo puntuale, che richiedono indagini di sito approfondite e una notevole quantità di dati difficilmente reperibili in modo continuo su tutta la superficie indagata; essa più che altro si propone come uno strumento di prima analisi della pericolosità del territorio, volta all'individuazione di quelle aree a maggiore suscettibilità al rischio da frana. La scelta dei fattori predisponenti utilizzati nel modello, nonché il tipo di approccio applicato per la stima della suscettibilità, si sono mostrati adeguati all'obiettivo che il presente lavoro si proponeva; infatti, tramite il dataset di training, utilizzato per la costruzione del modello è stato possibile classificare correttamente il 77% di aree in frana e l'80% di aree non in frana; di contro tramite il dataset

di validation (non utilizzato nella costruzione del modello) e che ci ha permesso di definire la capacità previsionale del modello, sono state individuate correttamente l'81% delle aree in frana e il 80% delle aree non in frana. Tali risultati confermano la buona capacità previsionale e l'adeguatezza della regressione logistica per questo tipo di elaborazioni. I valori di Contrasto ( $C$ ), definito come il grado di associazione spaziale tra la franosità e ciascuna classe di ogni variabile, hanno messo in evidenza i fattori maggiormente influenti all'interno del modello per l'individuazione delle aree a diversa suscettibilità. Da ciò si evince che la variabile pendenza gioca un ruolo predominante, seguita dal curve number, mentre gli indicatori ambientali quali la litologia e l'uso del suolo influiscono in maniera minore probabilmente perché risentono di una minor precisione dovuta alla scala di rilevamento; analogamente l'indice di anomalia pluviometrica ha un'influenza minore probabilmente perché il regime pluviometrico siciliano è raggruppabile in sole tre tipologie tratte poco diverse tra loro e tutte comunque riconducibili al tipico clima mediterraneo.

L'affidabilità dell'analisi, verificata nel processo di validazione del modello, porta a considerare l'elaborato finale come utile strumento di consultazione in sede di pianificazione a scala regionale. Naturalmente la disponibilità di banche dati continuamente aggiornate e multi-scala costituisce la condizione primaria per l'aggiornamento e il miglioramento degli output finali. L'utilizzo di tecnologie *GIS-embedded* e l'estensione del lavoro a scala nazionale, con successiva pubblicazione dei risultati in rete tramite piattaforma *WebGIS*, permetterebbero agli enti preposti alla tutela e gestione del territorio (e non solo) nella delicata gestione dei processi decisionali, la consultazione di uno strumento di supporto per una più corretta utilizzazione del territorio nazionale.

Concludo con due frasi che ritengo siano di primaria importanza; la prima riguarda l'utilizzo dei modelli statistici nei quali vale sempre l'assunto che *“non essendoci nessun contributo della fisica all'evento, i modelli statistici possono imparare solo quello che i dati insegnano loro”* e la seconda, attribuita al geologo francese *Marcel Roubault*, riguarda la necessità da parte di Enti e Amministrazioni territoriali di possedere modelli previsionali: *“se l'uomo non può impedire tutto, può prevedere molto”*[88].

## Bibliografia

- [1] CNR - GNDCI, *Catalogo delle informazioni sulle località italiane colpite da frane e da inondazioni*. Vol. I e II. CNR - GNDCI Pubbl. n. 1799, Grifo, Perugia, 404, 1998
- [2] CANUTI P. & CASAGLI N., *Considerazioni sulla valutazione del rischio di frana. Atti del Convegno. "Fenomeni franosi e centri abitati"*. Bologna, 27 Maggio 1994. CNR-GNDCI - Regione Emilia-Romagna. 29-130. (CNR-GNDCI Pubbl. n.846), 1996.
- [3] INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in the European Community*) Directive 2007/2/EC del Parlamento Europeo della Giunta del 14 Marzo 2007. Giornale Ufficiale dell'Unione europea, 25 Aprile 2007.
- [4] CARRARA A., CARDINALI M., DETTI R., GUZZETTI F., PASQUI V., REICHENBACH P., *Geographical Information Systems and multivariate model in landslide hazard evaluation*. In: Alps 90. A.Cancelli (ed.) 6th Int. Conf. & Field. Workshop on Landslides. Milano, 17 - 28, 1990.
- [5] CARRARA A., CARDINALI M., GUZZETTI F., REICHENBACH P., *GIS Techniques in Mapping Landslide Hazard*. In: *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. A. Carrara and F. Guzzetti (eds.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 135 - 175, 1995.
- [6] VERSACE P., CANUTI P., CIVITA M., LANDRINI C., NATALE L., *Programmi nazionali, provinciali e regionali di previsione e prevenzione per il rischio idrogeologico - Linee guida*. CNR - GNDCI, Roma, 1995.
- [7] GASPERI G., *Geologia Regionale - Geologia dell'Italia e delle regioni circummediterranee*. Pitagora Editrice Bologna. p. 316 - 358, 1995.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [8] GIUNTA G., LIGUORI V., *Evoluzione Paleotettonica della Sicilia Nord - Occidentale*. Boll. Soc. Geol. It., 92, 903 - 824, 1973.
- [9] CATALANO R., D'ARGENIO B., *Schema geologico della Sicilia*. In Catalano R. & D'Argenio B.: In Guida alla geologia della Sicilia occidentale. Soc. Geol. It., Guide Geologiche Regionali, 9 - 41, 1982.
- [10] MONTANARI L., *Lineamenti stratigrafico - paleogeografici della Sicilia durante il ciclo alpino*. Mem. Soc. Geol. It., 38, 361 - 406, 1987.
- [11] LUCCHESI T., AGNESI V., *Analisi del dissesto da frana in Sicilia*. In APAT - AGENZIA PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE E PER I SERVIZI TECNICI. Rapporto sulle frane in Italia. Vol. unico. pp. 633 - 649. ROMA. APAT. ISBN: 978 - 88 - 448 - 0310 - 0, 2007.
- [12] PEDLEY H.M., *Sedimentology and palaeoenvironment of the Southeast Sicilian Tertiary platform carbonates*. Sedimentary Geology, 28, 273 - 291, 1981.
- [13] CATALANO R., MONTANARI L., *Geologia dei Monti di Trabia-Termini Imerese e dei Monti Sicani orientali (Fogli Bagheria e Termini Imerese. Sicilia centrosettentrionale)*. Rend. Acc. Sc. Fis. e Mat. in Napoli, IV, XLVI, 29 pp., 1979.
- [14] OGNIBEN L., *Nota illustrativa dello schema geologico della Sicilia Nord-Orientale*. Riv. Min. Sic., II (64-65): 183-212, Palermo, 1960.
- [15] OGNIBEN L., *Schema introduttivo alla geologia del confine Calabro-Lucano*. Mem. Soc. Geol. It., 8 (4), 453-463, 1969.
- [16] OGNIBEN L., *Schema geologico della Calabria in base ai dati odierni*. Geol. Rom. 12, 243-585, 1973.
- [17] AMODIO MORELLI L., BONARDI G., COLONNA V., DIETRICH D., GIUNTA G., IPPOLITO F., LIGUORI V., LORENZONI S., PAGLIONICO A., PERRONE V., PICCARRETTA G., RUSSO M., SCANDONE P., ZANETTIN-LORENZONI E. e ZUPPETTA A., *L'arco calabro-peloritano nell'orogene Appenninico-Maghrebide*. Mem. Soc. Geol. It., XVII, 1-70, 1977.

- [18] DRAGO A., *Atlante Climatologico della Sicilia - Seconda Edizione*. Rivista Italiana di Agrometeorologia 67 - 83 (2), 2005.
- [19] HANSEN A., *Landslide hazard analysis*. In: Brunsten D. e Prior D. B., (Eds.), Slope instability, Wiley & Sons, New York, 523 - 602, 1984.
- [20] PARISE M., WASOWSKI J., *Landslide activity maps for landslide hazard evaluation: three case studies from Southern Italy*. Natural Hazard, 20 (2/3), 159-183, 1999.
- [21] BRABB E. E., *Innovative approaches to landslide hazard mapping*. 4th International Symposium on Landslides, Toronto, v. 1, 307 - 324, 1984.
- [22] CARDINALI M., ANTONINI G., REICHENBACH P. & GUZZETTI F., *Carta foto - geologica ed inventario dei movimenti franosi dell'alto bacino del Fiume Tevere*. Pubblicazione CNR GNDCI n. 2154, Scala 1:100000, 2001.
- [23] GUZZETTI F. & CARDINALI M., *Landslide inventory map of the Umbria region, Central Italy*. In: Cancelli, Andrea (Ed.), ALPS 90, 6th International Conference and Field Workshop on Landslides, Milano, 273 - 284, 1990.
- [24] AGNESI V., CARRARA A., MACALUSO T., MONTELEONE S., PIPITONE G. e SORRISO - VALVO M., *Elementi tipologici e morfologici dei fenomeni di instabilità dei versanti indotti dal sisma del 1980 (Alta Valle del Sele)*. Geol. Appl. Idrogeol., 18, 309 - 341, 1983.
- [25] CARRARA A., CARDINALI M., GUZZETTI F., *Uncertainty in assessing landslide hazard and risk*. ITC Journal, The Netherlands, Vol. 2, 172-183, 1992.
- [26] GALLI M., ARDIZZONE F., CARDINALI M., GUZZETTI M, REICHENBACH P., *Comparison of landslide inventory maps*. Geomorphology 94, 268-289, 2008.
- [27] CARRARA A., D'ELIA B., SEMENZA E., *Classificazione e nomenclatura dei fenomeni franosi*. Geol. Appl. e Idrog. Vol. 20, Bari, 1985.
- [28] FRATTINI P., CROSTA G.B., CERIANI M., FOSSATI D. *Inventario delle frane e dei dissesti della regione Lombardia: analisi statistica e probabilistica per una valutazione preliminare della pericolosità*. AIGA, I Convegno Nazionale, 427- 448, 2003.

- [29] ERMINI L., CATANI F., CASAGLI N. *Artificial neural networks applied to landslide hazard assessment*. *Geomorphology*, 66: 327-343, 2005.
- [30] CUMER A., *Il progetto CORINE Land Cover in Italia: un modello da seguire*. Documenti del territorio, Anno VIII, n. 28/29 giugno/dicembre 1994.
- [31] LUCINI P., *Un metodo grafico per la valutazione della pericolosità*. Mem. Note Ist. Geol. Appl., Napoli, 2, 1-14, 1969.
- [32] HORN B. K. P. *Hill shading and reflectance map*. *Proceedings IEEE*, 69(1), 14- 47, 1981.
- [33] ZEVENBERGEN L. W., THORNE C. R. *Quantitative analysis of land surface topography*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47-56, 1987.
- [34] DAPPORTO S., FALORNI G., TOFANI V., VANNOCCI P. *Analisi delle variazioni di pressione interstiziale alla base dei movimenti franosi durante l'evento del Novembre 2000 in Toscana*. "Conservazione dell'ambiente e rischio idrogeologico" Convegno Nazionale, Assisi 11-12 Dicembre 2002.
- [35] PELLEGRINI M., BERTOLINI G., TOSATTI G. *Le frane della regione Emilia-Romagna, oggetto di interventi di protezione civile nel periodo 1994-1999*. Quaderni di geologia applicata, 8 (1,2), 2001.
- [36] MARICCHIOLO C., SAMBUCINI V., PUGLIESE A., BLASI C., MARCHETTI M., CHIRICI G., CORONA P., *La realizzazione in Italia del progetto europeo I&CLC2000: metodologie operative e risultati*. Atti della 8° Conferenza Nazionale ASITA - Roma 14 - 17 Dicembre 2004.
- [37] Soil Conservation Service (SCS), *National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology*. United States Department of Agriculture (USDA), Washington DC, 1972.
- [38] XIAOYONG ZHAN, MIN-LANG HUANG, *ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps*. *Environmental Modelling & Software* 19, 875-879, 2004.



- [39] BORSELLI L., *Previsione dei deflussi superficiali su versante: il metodo S.C.S. Curve Number e sua applicabilità nell'ambiente collinare italiano*. Quaderni di scienza del Suolo, 2, 145-160, 1989.
- [40] PASSALACQUA R., *Vulnerabilità territoriale da frane e crolli in roccia*. Progetto GERIA, dossier tematico. Collana Territorio e Ambiente. Regione Liguria, 2002.
- [41] WIECZORECK G.F., SARMIENTO J., *Rainfall, piezometric levels, and debris flows near la Honda, California, in storms between 1975 and 1983*. In: Ellen, S.D., Wieczoreck G.F. (Eds.), *Landslides, Floods, and Marine effects of the Storms of January 3-5, 1982, in the San Francisco Bay Region, California, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, vol. 1434, pp. 43-62, 1988.
- [42] FIORILLO F., WILSON R.C., *Rainfall induced debris flows in pyroclastic deposits, Campania (Southern Italy)*. *Engineering Geology*, 75/3-4, 263-289, 2004.
- [43] WIECZORECK G.F., GLADE T., *Climatic Factor influencing occurrence of debris flows*. In "Debris-flow Hazard and Related Phenomena", M. Jakob and O. Hung eds; Springer Berlin Heidelberg, 325-362, 2005.
- [44] TERLIEN M.T.J., *The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds*. *Environmental Geology*, 35, 124-130, 1998.
- [45] VAN ASCH T.W.J., BUMA J, VAN BEKK L.P.H., *A view on some hydrological triggering system in landslides*. *Geomorphology*, 30, 25-32, 1999.
- [46] GALLIANI G., POMI L., ZINONI F., CASAGLI N., *Analisi meteorologica e soglie pluviometriche di innesco delle frane nella regione Emilia-Romagna negli anni 1994-1996*. *Quaderni di Geologia Applicata*, 8 - 1, 75-91, 2001.
- [47] CANUTI P., FOCARDI P., GARZONIO C.A., *Correlation between rainfall and landslides*. *Proc. 27<sup>th</sup> I.G.C., Bull. IAEG.*, 32, pp. 49-54, Moscow, 1985.
- [48] MITASOVA H., HOFIERKA J., *Interpolation by Regularized Spline with Tension: II. Application to Terrain Modelling and Surface Geometry Analysis*. *Mathematical Geology*, 25 (6), 657-669, 1993.

- [49] MITASOVA H., MITAS L., BROWN W.M., *Modeling spatial and temporally distributed phenomena: new methods and tools for GRASS GIS*. International Journal of Geographic Information Systems, 9 (4), 443–446, 1995.
- [50] D'AMATO AVANZI G., GIANNECCHINI R., PUCCINELLI A., *The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides. An example on a temperate climate environment: the june 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy)*. Engineering Geology 73, pp. 215-228, 2004.
- [51] FRATTINI P., CROSTA G.B., CERIANI M., FOSSATI D., *Inventario delle frane e dei dissesti della regione lombardia: analisi statistica e probabilistica per una valutazione preliminare della pericolosità*. AIGA I° Convegno Nazionale, 2003.
- [52] INSPIRE, *Infrastructure for SPatial InfoRmation in Europe*. <http://inspire.jrc.ec.europa.eu/>.
- [53] Intesa GIS, *INTESA STATO - REGIONI ED ENTI LOCALI PER LA REALIZZAZIONE DEI SISTEMI INFORMATIVI GEOGRAFICI DI INTERESSE GENERALE*. <http://www.centrointerregionale-gis.it/script/scrp.asp?Pagecode=002>
- [54] GML, *Geography Markup Language*. <http://www.opengeospatial.org/>
- [55] SURACE L., *La georeferenziazione delle informazioni territoriali*. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, vol. LVII, N. 2, pp. 181 - 234, 1998.
- [56] BURCHIETTI G., CIMA V., MASEROLI R., SURACE L., *La georeferenziazione delle informazioni geologiche per GIS tematici a copertura nazionale: il problema dei sistemi di riferimento locali*. Atti della VII Conf. Naz. ASITA, "L'Informazione Territoriale e la Dimensione Tempo", Verona 28 - 31 ottobre 2003.
- [57] TROMBETTI C., (1) *La proiezione conforme di Gauss - Boaga*. (2) *I fusi della cartografia ufficiale italiana*. Bollettino di Geodesia e scienze Affini, vol. IX, N. 3, pp. 347 - 352, 1950.
- [58] SESTINI A., *Cartografia generale*. Patron Editore, 1981.
- [59] MASEROLI R., *Il sistema di riferimento WGS84*. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, vol. LIV, n. 2, pp. 209-218, 1995.

- [60] BONIFACINO B., *Formule fondamentali della rappresentazione gaussiana della sfera sul piano*. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini Anno XIX n. 5, IGM, Firenze, 799 - 805, 1960.
- [61] SURACE L., *Ruolo e limiti delle rappresentazioni cartografiche nei sistemi informativi geografici di interesse nazionale*. Estratto edal “Bollettino di Geodesia e Scienze Affini” Rivista dell’Istituto Geografico Militare Anno LXIII - N. 1 - Gennaio - Febbraio - Marzo 2004.
- [62] VARNES D. J. & IAEG COMMISSION ON LANDSLIDE, *Landslide hazard zonation - a review of principles and practice*. UNESCO, Paris 63 pp., 1984.
- [63] LEROI E., *Landslide hazard-Risk maps at different scales: objectives, tools and developments*. In Proc. VII Int. Symp. Landslides, Trodheim, June, 1, 35-52, 1996.
- [64] SOETERS R., VAN VESTEN C.J., *Slope stability recognition, Analysis and Zonation*. In Landslides: Investigation and Mitigation, Schuster & Turner Eds., Transportation Research Board, Special Report 247, National Research Council, 129-173, 1996.
- [65] NASH D., *A comparative review of limit equilibrium methods of stability analysis*. In Anderson M.G. and Richards K.S., editors, *Slope Stability*, pages 11-75. John Wiley and Sons, 1987.
- [66] AGRESTI A., FINLAY B., *Statistical Methods for the Social Sciences*. New Jersey, Prentice Hall, 1997.
- [67] FEDERICI P.R., PUCCINELLI A., CANTARELLI E., CASAROSA N., D’AMATO AVANZI G., FALASCHI F., GIANNECCHINI R., POCHINI A., RIBOLINI A., BOTTAI M., SALVATI N., TESTI C., *Multidisciplinary investigations in evaluating landslide susceptibility - An example in the Serchio River valley (Italy)*. Quaternary International 171–172 52–63, 2007.
- [68] HANLEY J.A., MCNEIL B.J., *The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve*. Radiology, 143(1):29 - 36, 1982.
- [69] MARZBAN C., *A comment on the ROC curve and the area under it as performance measures*. Technical report, The Applied Physics Laboratory and The Department of

- Statistics, University of Washington and Center for Analysis and Prediction of Storms, University of Oklahoma, 2004.
- [70] *An Essay towards solving a Problem in the Doctrine of Chances*. By the late Rev. Mr. Bayes, communicated by Mr. Price, in a letter to John Canton, M. A. and F. R. S.
- [71] MIRABELLA C., ARNONE E., LO CONTI F., NOTO L.V., LA LOGGIA G., *Elaborazione di una mappa di suscettibilità delle aree in frana a scala di bacino*. In: 13a Conferenza Nazionale ASITA. Bari, Dicembre 2009.
- [72] SAWATZKY D.L., RAINES G.L. , BONHAM-CARTER G.F., LOONEY C.G., *ARCSDM3.1: ArcMAP extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis*. <http://www.ige.unicamp.br/sdm/ArcSDM31/>, 2004.
- [73] BONHAM-CARTER G.F, AGTERBERG F.P., *Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential, Statistical applications in the Earth Sciences* – Geological Survey of Canada, Paper 89(9): 171 - 183, 1990.
- [74] POLI S., STERLACCHINI S., *Landslide representation strategies in susceptibility studies using Weinghs of Evidence modeling technique*. Natural Resources Research, Vol. 16, No 2, June 2007.
- [75] CARRANZA E. J. M., *Geologically-constrained mineral potential mapping (examples from the Philippines), unpubl. doctoral dissertation*. Univ. Technology, Delft, The Netherlands, 480 p, 2002.
- [76] LULSEGED A., HIROMITSU Y., *The application of GIS - based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda - Yahiko Mountains, Central Japan*. Geomorphology 65: 15 - 31, 2004.
- [77] RAINES G. L., *Evaluation of weights of evidence to predict epithermal-gold deposits in the great basin of the western United States*. Natural Resources Research, v. 8, no. 4, p. 257–276, 1999.
- [78] BONHAM-CARTER G. F., *Geographic information system for geoscientists: modelling with GIS*. Pergamon Press, Oxford, v. 13., 398 p, 1994.

- [79] CARRANZA E. J. M., *Weights of evidence modeling of mineral potential: a case study using small number of prospects, Abra, Philippines*. Natural Resources Research, v. 13, no. 3, p. 173–187, 2004.
- [80] SARO L., BISWAJEET P., *Landslide hazards mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models*. Landslides 4: 33 - 41, 2007.
- [81] ERMINI L., CATANI F., CASAGLI N., *Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment*. Geomorphology 66, 327–343, 2005.
- [82] CATANI F., CASAGLI N., ERMINI L., RIGHINI G., MENDUNI G., *Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno river basin*. Landslides. 2, 329 - 342, 2005.
- [83] LENTINI F., CARBONE S., CATALANO S., *Main structural domains of the central mediterranean region and their tectonic evolution*. Boll. Geofis. Teor. e Appl., 36 (n°141-144), 103- 125, 1994.
- [84] GUZZETTI F., CARRARA A., CARDINALI M., REICHENBACH P., *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy*. Geomorphology 31: 181 - 216, 1999.
- [85] CHUNG C.F., FABBRIO A.G., *Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping*. Nat Hazards 30: 451-472, 2003.
- [86] LO CICERO G., CATALANO R., *Facies and petrography of some Messinian evaporites of the Ciminna basin (Sicily)*. Mem. Soc. Geol. It., XVI, 63 - 81, 1976.
- [87] DI GRANDE A., GIANDINOTO V., *Plio-Pleistocene sedimentary facies and their evolution in centre-south-eastern Sicily: a working hypothesis*. European Geosciences Union - 1, 211 - 221, 2002.
- [88] ROUBAULT M., *Le catastrofi naturali sono prevedibili (Alluvioni, terremoti, frane, valanghe)*. Piccola Biblioteca Einaudi 208, 1973.

## BIBLIOGRAFIA

---

# Ringraziamenti

In *primis* ringrazio l'Istituto Geografico Militare ed in particolare il Servizio Geodetico per avermi dato la possibilità, non solo economica, di svolgere questo ulteriore percorso di studio. Il secondo ringraziamento va al Dott. Filippo Catani, la cui guida attenta e scrupolosa mi ha consentito di sviluppare al meglio questo lavoro. Un sentito grazie al Prof. Nicola Casagli e al Prof. Sandro Moretti che hanno creduto in me sin dall'inizio offrendomi, nonostante non fossi più un giovane studente, la possibilità di questa meravigliosa esperienza. Un grazie affettuoso lo dedico ai miei genitori, a mia madre formidabile *punchball* delle mie nevrosi, a mio padre attento consigliere durante la stesura finale del lavoro. Un ringraziamento particolare lo rivolgo all'Ing. Alessandro Battistini, il cui contributo è stato fondamentale per la realizzazione di molti degli script utilizzati nel presente lavoro. Un gigantesco grazie al formidabile gruppo di lavoro "GeoApp" con cui ho condiviso molte delle ore di lavoro di questi ultimi quattro anni ma anche momenti indimenticabili di sorriso, di discussione, di rabbia, di pianto, di scherzo...Gabriele, Guglielmo, Lorenzo, Alessandro, Angelo, Chiara, Veronica, Sara, Francesca, Melania, Silvia, Luca, Samuele, Stefano, Ping, Giovanni, Francesco e Ascanio. Un sentito ringraziamento al Prof. Bartolini per la sua sapiente lucidità sia nelle discussioni scientifiche che nelle innumerevoli riflessioni critiche sul modo di essere del genere umano. Infine il grazie più grande lo devo a Federica, compagna di vita, che mi ha sempre sostenuto ed aiutato per far sì che terminassi questa esperienza e che nel 2009 mi ha regalato Amaranta, figlia e creatura tanto meravigliosa quanto birbante...a loro è dedicato questo lavoro.