

MASSIMILIANO BENCARDINO

ANALISI DELLA FRANOSITÀ NEL BACINO DEL FIUME BASENTO ATTRAVERSO L'UTILIZZO DI IMMAGINI SATELLITARI LANDSAT

Introduzione. – L'area di studio è il bacino idrografico del Fiume Basento, in Basilicata, esteso a sud-est della città di Potenza e comprendente i comuni di Brindisi di Montagna, Vaglio Basilicata e Tricarico. L'area ha forma all'incirca quadrangolare e una superficie di 63 km² ed è attraversata dal fiume da nord a sud-est.

Per le finalità dello studio sono stati utilizzati dati satellitari, quali immagini Landsat 7 ETM multispettrali in banda ottica, un modello digitale del terreno (DEM) fornito dall'Istituto Geografico Militare, e dati cartografici quali carte geologiche redatte dal Servizio Geologico d'Italia, una caratterizzazione geologica dell'area in esame più approfondita, commissionata dal Dipartimento di Ingegneria Geotecnica dell'Università di Napoli «Federico II», e una mappatura completa delle frane che insistono nell'area in esame. Lo studio si è inoltre avvalso di un supporto di dati forniti dal Dipartimento di Ingegneria Geotecnica, che ha operato una analisi profonda e dettagliata dell'area, tale da dare ai risultati un significato pregnante e approfondito (Guida e Iaccarino, 1991; Pelligrino e altri, 2000).

La classificazione è stata finalizzata allo sviluppo di una mappa di suscettibilità attraverso l'elaborazione delle immagini e di altri dati disponibili. Nel processo di classificazione, in primo luogo sono state individuate, quali aree del «training set», frane effettivamente già presenti sul territorio; questa base di dati è stata utilizzata dal *software* (*image processing*) per rilevare all'interno dell'area di studio tutte le aree che, per firma spettrale, per litotipo di appartenenza e per orografia del suolo, fossero simili alle aree già individuate nel *training set*.

Sulle frane individuate dal classificatore è stato fatto un *test* per verificare la congruenza dei risultati; i risultati ottenuti sono stati messi a confronto con un altro *data set* composto da altre aree, individuate preventivamente insieme a quelle del *training set*, diverse dalle precedenti e definite *test set*.

I fattori su cui si è concentrata l'attenzione di questo studio e quindi quelli che hanno ricoperto un ruolo determinante nella classificazione sono: caratteri litologici; umidità del suolo; uso del suolo e grado di vegetazione; pendenza. Ognuno di questi aspetti deve essere oggetto di uno studio particolare e specifico, perciò i risultati cui si perviene sono suscettibili di ulteriori aggiustamenti e miglioramenti derivanti da una fase di analisi più approfondita.

Le potenzialità del telerilevamento satellitare per il riconoscimento delle frane e le sue integrazioni con gli studi tradizionali. – Sono diversi gli studi in materia, come diverse sono le metodologie usate nella mappatura delle frane – in base alle diverse esigenze che i vari autori hanno incontrato – e quindi diversi sono stati i riferimenti di questo lavoro; in particolare si è fatto riferimento a quelli che hanno posto l'accento sull'uso di immagini ottiche.

Un primo lavoro preso in considerazione, redatto congiuntamente dal Joint Research Center, dall'Università di Cardiff e dall'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica del CNR (Padova), riguarda lo studio della frana di Tessina (Hervàs e altri, 2003). Sono qui state utilizzate immagini Ikonos, ed è stato proposto un metodo di *image processing*. È evidenziato come il riconoscimento della frana si realizzi attraverso indicatori opportunamente ricercati e non direttamente come avviene nelle immagini aeree, non avendo le immagini satellitari una visione stereoscopica. In un altro studio dell'International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC-Netherlands) è mostrato un modello sistemico di approccio a tali problematiche e le immagini Landsat sono utilizzate congiuntamente al DEM per ottenere una immagine in rilievo (van Westen, Montoya e Boerboom, 2002). Vengono implementate in un GIS tutte le tecniche oggi in uso nel riconoscimento delle frane. Uno studio del Land Development Department di Bangkok ha utilizzato una procedura automatica di classificazione delle frane, utilizzando il DEM e le immagini Landsat, per la mappatura delle coperture del suolo (Patanakanog, 2002). In un altro studio della Divisione di Cinematica e Dinamica della Terra (Kirghizistan), vengono utilizzati dati incrociati, provenienti dal Landsat-TM, ERS1/2, MOMS-2P e DEM, ai fini di una mappatura delle frane in una impervia zona montuosa. In questo caso le immagini Landsat sono usate per distinguere i diversi tipi di vegetazione e di suolo, e si è tentato di operare una differenziazione litologica. In questo studio su vasta area viene sottolineata la poca importanza della risoluzione spaziale rispetto al grande apporto dato dalle caratteristiche spettrali per la differenziazione litologica (Rössner e altri, 2001). Un ultimo studio che si vuole portare a riferimento è quello eseguito dal Servizio Geologico giapponese insieme con alcune università giapponesi su una regione indonesiana (Odajima e altri, 1998). In questo studio sono stati utilizzati dati SPOT, il DEM, la carta geologica, la carta topografica e carte delle isoiete. Da questi dati è stata ricavata una classificazione dei suoli e una densità di frane per ogni classe ai fini di una mappatura della suscettibilità dei suoli.

Analogamente a queste esperienze precedenti, nel presente lavoro si è cercato di arrivare a una classificazione automatica dei suoli, in funzione dei dati Landsat, del DEM (fig. 1), della carta geologica e di quella delle frane, per arrivare a una carta della suscettibilità, ossia una carta che indichi i suoli che per similitudine presentino un maggiore grado di rischio di franare (Ceccarelli e altri, 2001). L'insieme di tutti questi dati è integrato in un sistema di analisi secondo tecniche GIS, come è documentato in bibliografia (Lauberte e altri, 2001; van Westen, Wunderle e Pasquali, 2002).

Il contributo dato dal presente lavoro. – Il lavoro è stato anzitutto indirizzato alla ricerca di alcuni parametri che meglio rappresentassero il rischio di franare dei suoli.

Prima di scegliere quali parametri utilizzare nel procedimento di classificazione e quindi quali indicatori per caratterizzare le aree in frana, in questa ricerca si è cercato di sondare e valutare con stime quantitative tutti i vari possibili indicatori, sia a monte sia a valle del processo di classificazione. Il metodo usato per la scelta degli indicatori a monte della classificazione è il «test di ipotesi». Con questo strumento si verifica che l'uso di una particolare relazione tra le bande possa essere significativo, ovvero che il particolare indicatore scelto abbia dei valori significativamente diversi tra le aree in frana e le aree

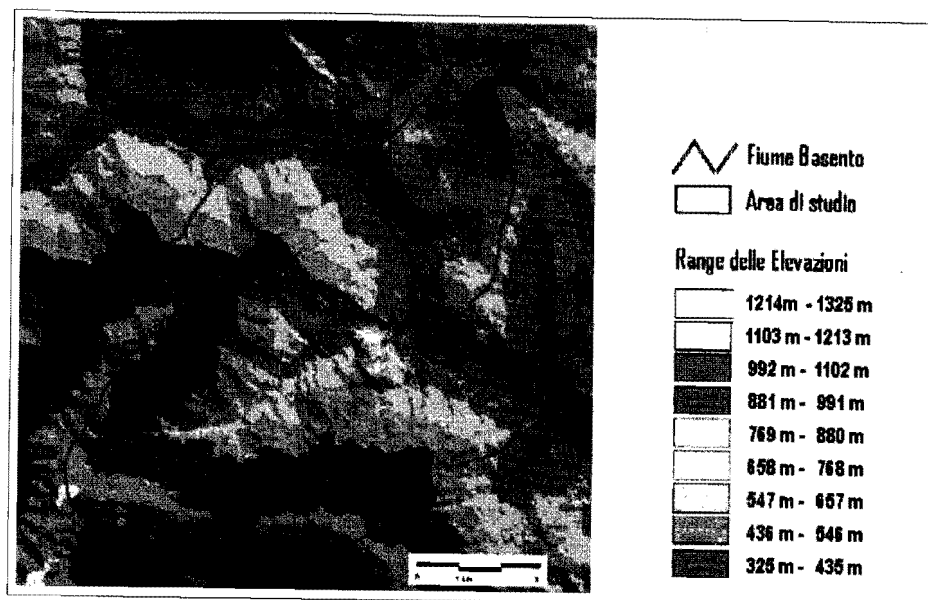


Fig. 1 – Bacino del Basento. Modello digitale del terreno (DEM)

non in frana. Attraverso il «test di Student», si verifica che le medie delle distribuzioni dei valori ricavati dalle aree in frana non appartengano alla stessa popolazione delle medie dei valori delle aree non in frana.

Gli indicatori che hanno dato risultati migliori, e che sono stati scelti per il processo di classificazione, sono l'«indice MIRI» (umidità del suolo) (Musick e Pelletier, 1988) e l'«NDVI» (indicatore del grado di vegetazione presente). Il primo mette in risalto il contenuto di umidità di un suolo, il secondo la percentuale di vegetazione. I risultati ottenuti dall'analisi di questi indicatori sembrano molto confortanti (Bencardino, 2002-2003).

In particolar modo è parso rilevante mettere in risalto l'uso, in questa elaborazione, dell'indice MIRI. Si è partiti dal presupposto che essendo le frane in questi terreni molto superficiali, ed essendo quindi interessati allo stato del terreno nei primi metri di profondità, potesse essere sufficiente conoscere il livello idrico in questo strato per evidenziare la possibilità di un'attivazione delle frane o di una presenza di terreno in frana, attraverso lo stato di umidità del terreno stesso. Infatti, un terreno più umido potrebbe evidenziare la presenza di una falda molto prossima alla superficie del terreno, che si muove verso questo per risalita capillare. L'indice MIRI misura proprio l'umidità del terreno. È quindi un parametro molto interessante, soprattutto se monitorato nel tempo, che può fornire indicazioni quando è correlato a un movimento franoso.

Le immagini non sono l'unico tipo di dato di cui ci si serve in questo tipo di analisi. Nei procedimenti di *image processing* spesso si usa anche la cartografia classica elaborata da geologi e geotecnici, e quant'altro acquisito attraverso i mezzi tradizionali di indagine del suolo. Infatti, come è stato già evidenziato, le procedure di *image processing* non sostituiscono i metodi di indagine classici del territorio, ma rappresentano un complemento ad essi. In questo caso le successive elaborazioni sono state effettuate utilizzando due carte tematiche elaborate dal Dipartimento di Ingegneria Geotecnica in collaborazione con il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Napoli «Federico II»: una

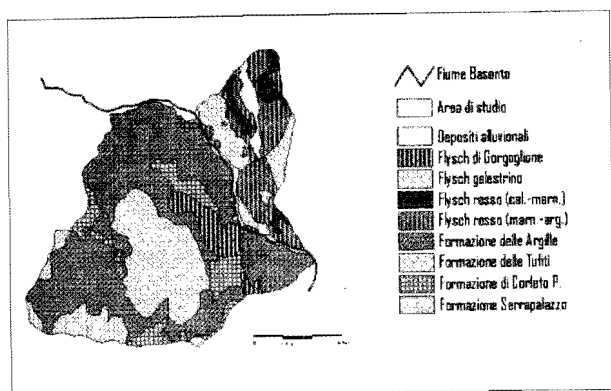


Fig. 2 – Carta geologica del bacino del Basento (Silvio Di Nocera)

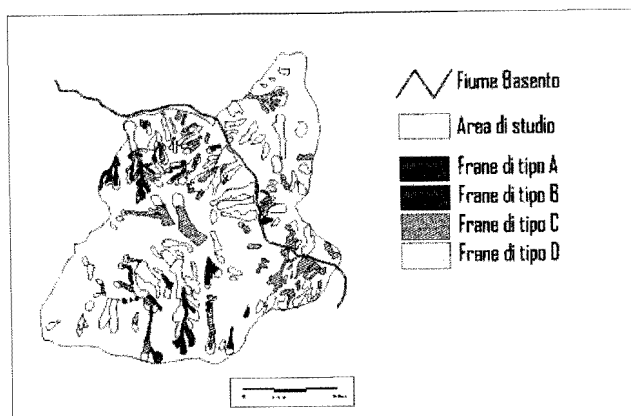


Fig. 3 – Carta delle frane nel bacino del Basento (Gian Maria Iaccarino)

prima riguardante la caratterizzazione geologica dell'area in esame (fig. 2), e una seconda, datata 1990, che rileva le frane in atto nel bacino (fig. 3).

Il processo di classificazione si è poi sviluppato attraverso l'uso congiunto di una classificazione *unsupervised* e di una *supervised*, utilizzando i dati provenienti dalle diverse fonti già evidenziate.

Mappa dell'umidità del suolo. Indice MIRI. – In particolar modo, è parso rilevante mettere in risalto l'uso, in questa elaborazione, dell'indice MIRI. Infatti, se l'indice NDVI è un indice ben noto per essere frequentemente usato in questo tipo di analisi, l'indice MIRI non è altrettanto noto e non è altrettanto usato.

Per comprendere meglio la bontà d'uso di questo parametro, è necessario premettere che si è cercato di mettere in relazione statistica (regressione) una variabile indipendente, la umidità ⁽¹⁾, valutata al suolo, e un'altra, la riflettanza in determinate lunghezze d'onda.

(1) Metodi empirici di rilevazione remota sono stati investigati per stabilire regressioni statistiche tra umidità del suolo e il valore di riflettanza di selezionate lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico (Coleman e Montgomery, 1987; Musick e Pelletier, 1988; Shih e Jordan, 1992; Dessena, 2003).

Tab. 1 – *Media e varianza degli indici MIRI e NDVI presi in esame relativamente al bacino del Basento*

Tipo di area	Indice MIRI		Indice NDVI	
	Media	Varianza	Media	Varianza
Frane tipo A	1,82	0,27	151	52,8
Frane tipo B	1,85	0,17	158	36,7
Frane tipo C	1,84	0,22	145	49,6
Frane tipo D	1,87	0,23	153	52,8
Aree stabili	1,91	0,26	163	56,3

Un modello di regressione è una relazione tra due variabili statistiche e si traduce in una relazione matematica che può essere lineare o meno. Per ogni osservazione i -esima della variabile dipendente vi è un residuo, rispetto alla funzione della variabile indipendente, che può essere interpretato come la parte del corrispondente valore che non è spiegata dalla relazione con la variabile indipendente. Per una generica regressione statistica si dimostra che sussiste la seguente relazione: $SST = SSR + SSE$, dove la somma totale dei quadrati (SST) dei valori della funzione risulta essere uguale alla somma dei quadrati dei valori della curva dalla regressione (SSR) più la somma dei quadrati degli errori (SSE). Sulla base della precedente relazione si ottiene quale indice di bontà della regressione, l'indice di determinazione $R^2 = SSR/SST$. Un valore elevato di R^2 indica che la variabile dipendente può essere ben spiegata dalla funzione.

Su questa base, si possono stabilire significative relazioni tra misure volumetriche del contenuto d'acqua della superficie del suolo (0-5 cm) e le sette bande del Landsat. L' R^2 di queste regressioni è solitamente tra 60 e 70 per cento. Data l'alta variabilità spaziale del contenuto d'acqua del suolo (Hendrickx, 1990) un R^2 di 60-70% è piuttosto alto e potrebbe essere quasi il limite superiore della variabilità di umidità del suolo che può essere misurata (Sheets e Hendrickx, 1995). La restante variabilità è casuale.

I ricercatori Musick e Pelletier nel 1988 hanno rilevato una correlazione tra l'umidità e il rapporto tra la banda 5 e la banda 7 del Landsat, che hanno definito indice MIRI. Il rapporto tra la banda 5 e la banda 7 del Landsat, TM5/TM7, separa unicamente terra e acqua. Siccome i suoli mostrano forte assorbimento nella banda 7 (2,08-2,35 μ) e alta riflettanza nella banda 5 (1,55-1,75 μ), il suolo viene evidenziato in questo rapporto. La terra appare con toni alti e l'acqua appare con toni scuri.

È stata quindi verificata la validità di utilizzo per il caso preso in esame. Si è verificato se i campioni di dati estratti dalla mappa dell'umidità riferiti alle aree di frana avessero un valore significativamente diverso dai valori riferiti ad aree stabili. Come risulta dalla tabella 1, e come è stato verificato attraverso il *test* T di Student, gli indici presi in esame risultano significativamente diversi a seconda dell'area in cui essi sono stati presi. Non solo, ma questi mostrano anche una certa gradualità in funzione del tipo di area presa in esame coerentemente con quanto viene confermato dalla teoria e con quanto ci si aspetterebbe.

Si è trovato, quindi, che tutti i campioni di aree in frana risultano appartenenti ad aree significativamente diverse da quelle di non frana; in particolare, nelle aree in frana è risultato un indice di umidità maggiore che nelle aree non in frana (fig. 4).

Inoltre è risultato che, eseguendo la stessa verifica con l'NDVI, direttamente proporzionale alla percentuale di vegetazione al suolo, i campioni delle aree in frana non appartengono alla medesima popolazione delle aree non in frana, e nello specifico che nelle aree in frana la vegetazione è inferiore rispetto alle aree non in frana. Ciò non è una



Fig. 4 – Bacino del Baisento. Carta dei risultati dell'indice MIRI. La carta mostra le zone in cui l'umidità del suolo è maggiore (aree più scure) e la corrispondenza con le frane in atto

sorpresa perché le aree in frana sono fortemente diboscate, in quanto i movimenti molto superficiali che interessano queste aree spazzano via la vegetazione.

I due dati congiunti danno luogo a un quadro d'insieme interessante: le aree in frana hanno più umidità e meno vegetazione, come in realtà si verifica per queste determinate aree, e questo è esclusivamente il risultato di una lettura di informazioni spettrali di immagini satellitari. Nonostante che il risultato dell'analisi sia molto confortante, l'attendibilità dei risultati è però condizionata dalla limitata fonte di analisi: in altre parole, il risultato è condizionato dal fatto di aver analizzato un'unica immagine Landsat (datata 14 giugno 2002). Una visione multi-temporale dell'andamento degli indicatori risulta essenziale per verificare la veridicità dei risultati dei *test* effettuati.

Il processo di classificazione. – Un importante processo di sviluppo di mappe interpretate da dati telerilevati è la *classificazione* delle immagini. Lo scopo principale di una procedura di classificazione di immagini è di raggruppare tutti i *pixels* di una immagine in un'unica classe o tema di copertura. Qui è stata usata la classificazione *supervised*, al fine di pervenire a una mappatura della probabilità di franosità dell'intera area di esame.

Il processo di classificazione è stato semplificato, vale a dire che, anziché classificare l'intera immagine con tutte le possibili classi presenti, si è ricondotto il territorio a due sole classi, frane e non frane, in maniera tale da evidenziare tutto quel territorio che ha caratteristiche simili alle frane e definirlo come «area a pericolo frana». L'obiettivo, quindi, non è stato assegnare una classe a ogni porzione di territorio, ma assegnare a ogni porzione di territorio una probabilità di appartenenza – o se vogliamo di correlazione – alle aree in frana. A tal fine sono stati raggruppati in aree omogenee (ROIs) i gruppi di *pixels* che corrispondono alle aree di frana.

Fig. 5 – Bacino del Basento.
Aree del «training set frane»

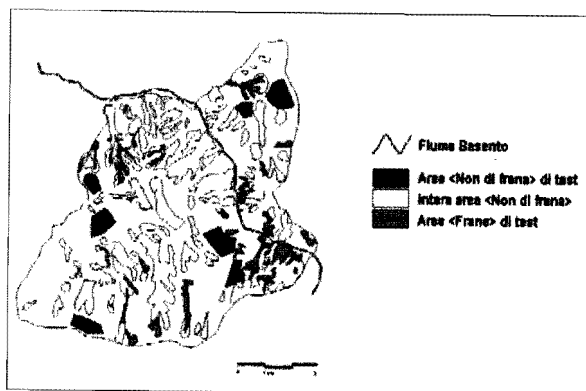
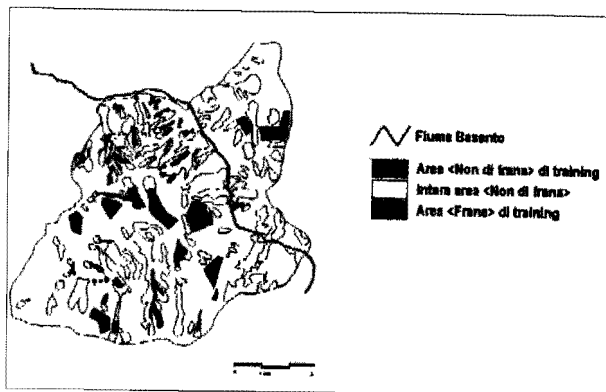


Fig. 6 – Bacino del Basento.
Aree del «test set frane»

In figura vengono mostrate le aree utilizzate per la calibrazione della classificazione (aree del *training set*) e le aree per la verifica della stessa (*test set*). Le aree utilizzate per il *test* sono state scelte in modo tale che entrambi i campioni fossero rappresentativi di ogni tipologia di frana analizzata e nello stesso tempo di tutto il sistema di frane del bacino (figg. 5 e 6).

Una volta definite le aree omogenee, è necessario porre l'accento sulla scelta degli indicatori che sono stati usati per la classificazione. Gli indicatori che si è scelto di usare nella classificazione sono essenzialmente quattro: litologia; indice MIRI; NDVI; pendenza del suolo.

Prima di avviare il processo di classificazione *supervised* si è ritenuto, però, di aggiungere un ulteriore indicatore: una pre-classificazione *unsupervised*, fatta sulle bande 2, 3, 4, 5, 7 del Landsat. Questa procedura è già stata utilizzata in molte sperimentazioni ed è abbastanza frequente quando si opera una classificazione *supervised*. Essa in realtà, pur non dando luogo a un preciso riscontro fisico delle classi, ha portato a dei buoni risultati in diversi studi – e in questo ha migliorato il processo di classificazione. Si è scelto di trascurare le bande 1 e 6 per due motivi distinti. La banda 1 perché questa è presentata in letteratura come la banda che risente maggiormente delle condizioni atmosferiche, la 6 perché ha una diversa risoluzione geometrica e può disturbare la fase di riconoscimento delle classi.

Un'altra operazione da compiere, nella classificazione con *K-Means*, è la scelta dei parametri: bisogna scegliere il numero di classi in cui si ritiene opportuno rappresentare il territorio, e stabilire delle soglie per la distanza o la varianza. Si è scelto di avere una clas-

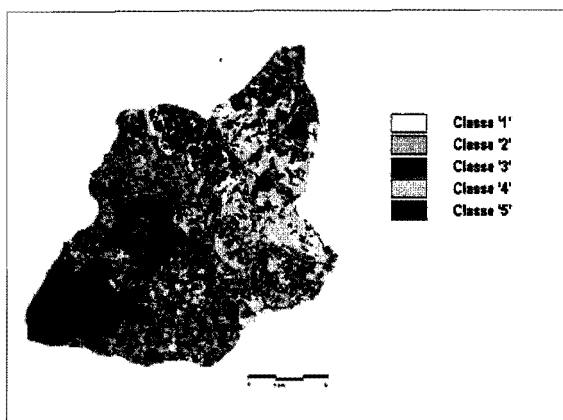


Fig. 7 – Bacino del Basento. Classificazione dei suoli con metodo K-Means sulle bande Landsat

sificazione in cinque classi di appartenenza, per dare luogo a una classificazione delle sole macro-strutture senza scendere troppo nel dettaglio, e di non porre nessuna soglia alla distanza o alla varianza. Il risultato di questa preclassificazione è mostrato nella figura 7.

Prima di avviare la classificazione *unsupervised* sulle cinque bande Landsat è stata effettuata una riduzione delle stesse alle componenti principali (PC). Il risultato di questa riduzione alle componenti principali è di mettere insieme in un minor numero di bande più del 95% della varianza dei dati (fig. 8). La prima banda PC contiene larga percentuale della varianza dei dati, caratterizzata dal parametro «autovalore», la seconda e la terza hanno anch'esse una certa percentuale di informazioni, dalla quarta in poi le bande appaiono come «rumore di fondo», ovvero mostrano una immagine disturbata che non dà nessuna informazione, in quanto non c'è alcuna varianza tra i valori di ogni *pixel*. La classificazione, quindi, non verrà più fatta sulle cinque bande originarie bensì sulle prime tre componenti principali. Questo procedimento snellisce di molto le operazioni di classificazione, soprattutto quando si ha a che fare con un gran numero di bande o con immagini molto grandi.

Compite queste operazioni, si passa alla classificazione vera e propria, quella *supervised*, effettuata sulle aree di *training* precedentemente assegnate e sui seguenti indicatori, l'ultimo dei quali è proprio il risultato della preclassificazione *unsupervised*: litologia; indice MIRI; NDVI; pendenza del suolo; preclassificazione *K-Means*.

In questa nuova classificazione si è ritenuto di non effettuare la riduzione alle componenti principali perché, come si è riscontrato tramite verifiche a valle del processo di classificazione, la riduzione non ha migliorato la qualità dei risultati. In effetti solo tre dei cinque indicatori della classificazione con supervisione ha origine dalle bande satellitari, e di questi uno ha già subito un processo di riduzione alle componenti principali, ciò che comporta di fatto già una sintesi delle informazioni di partenza.

La classificazione *supervised* restituisce due tipi di risultati grafici, uno in cui il classificatore assegna ogni porzione di territorio a una classe scegliendo la classe la cui probabilità sia più alta, e un secondo tipo in cui sono mostrate proprio le probabilità di appartenenza a ogni classe (figg. 9 e 10).

Nella figura 9 è riportato il risultato della classificazione. In questa immagine l'area grigia è l'area classificata come «a pericolo frana». Nella figura 10 è evidenziata la probabilità di ogni *pixel* di appartenere alla classe «frane». Tale indice va dal nero, quando viene esclusa completamente la probabilità di appartenenza alla classe delle frane, al bianco, dove la probabilità viene considerata massima. Sull'immagine sono stati sovrascritti i

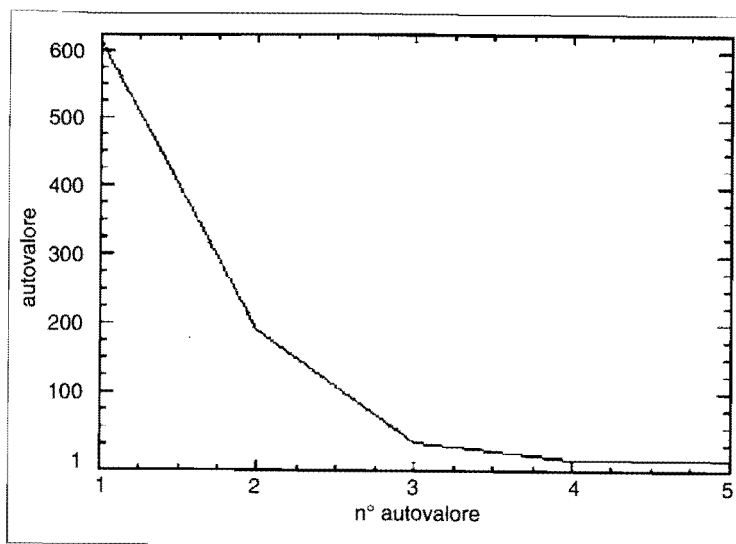


Fig. 8 - Bacino del Basento.
Bande 2, 3, 4, 5,
7 del Landsat

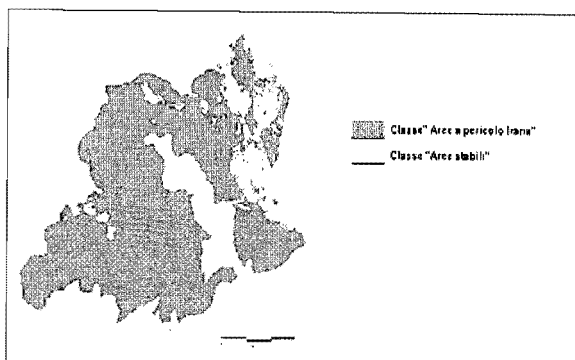


Fig. 9 - Bacino del Basento.
Classificazione supervised delle
aree

confini delle frane presenti nel bacino, per evidenziare la corrispondenza dei risultati con la realtà attuale.

A questi risultati si può applicare anche un parametro di valutazione meno soggettivo; per far ciò esistono diversi metodi. Un parametro molto usato è la matrice di confusione, una matrice quadrata sulla cui diagonale sarà visualizzata la percentuale con cui il processo di classificazione ha riconosciuto le aree di *training*, se questo calcolo si fa sulle aree di *training*, e in un secondo momento se ha riconosciuto la natura delle aree di *test*, se questi sono i valori su cui effettua la verifica.

Di seguito sono riportate le matrici di confusione, delle quali la prima (tab. 2) ha avuto un'accuratezza del risultato dell'86,80% e la seconda (tab. 3) del 74,97%.

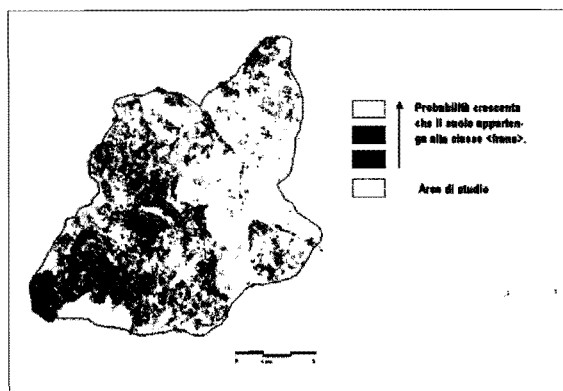
La prima delle matrici (tab. 2) mostra che il classificatore ha riconosciuto le aree, che noi abbiamo definito aree in frana, come tali al 95%. La seconda (tab. 3) è più significativa e mostra come il classificatore sia riuscito a trovare ben il 79% delle aree in frana rimanenti, aree prima sconosciute. Se, quindi, provando a classificare come «frana» o «area stabile» un'area sulla quale non si aveva alcuna informazione, si sarebbe avuto il 50% di possibilità di individuare la natura effettiva della porzione di territorio, con questo procedimento ci si può spingere ad assegnare un'appartenenza più certa. Va anche evidenziato che il classificatore è riuscito a riconoscere meglio la classe «frana» che quella di «non

Tab. 2 – *Verifica dei risultati (matrice di confusione) del training effettuato sulle classi dei suoli nel bacino del Basento*

	<i>Training «Frane»</i>	<i>Training «No frane»</i>
Classe «Frane»	95,07	27,11
Classe «No frane»	4,93	72,89
<i>Totale</i>	<i>100,00</i>	<i>100,00</i>

Tab. 3 – *Verifica dei risultati (matrice di confusione) del test effettuato sulle classi dei suoli nel bacino del Basento*

	<i>Test «Frane»</i>	<i>Test «No frane»</i>
Classe «Frane»	79,02	29,97
Classe «No frane»	20,98	70,03
<i>Totale</i>	<i>100,00</i>	<i>100,00</i>

Fig. 10 – *Bacino del Basento. Carta della probabilità che i suoli appartengano alla classe «frane»*

frane», e questo potrebbe essere dovuto alla non ottimale scelta della aree da parte dell'operatore.

Più interessante è stato osservare i risultati in una singola classe litologica. È, infatti, all'interno della stessa classe litologica che si possono meglio ricavare informazioni circa le contingenze che inducono un'area a franare meno che un'altra, ovvero informazioni riguardo gli indicatori che non sono la litologia: in particolare l'umidità e la pendenza. Dallo studio acquisito risulta evidente che la classe più franosa è la Formazione delle Argille Varicolori. Su questa classe è stata effettuata una nuova classificazione, mascherando quindi tutte le altre formazioni geologiche. Le aree di calibrazione e di verifica per effettuare questo ulteriore processo non sono quelle usate nella prima classificazione, ma altre, individuate all'interno della sola Formazione delle Argille Varicolori. Nell'immagine in figura 11 è rappresentato il risultato della classificazione fatta sulla sola area del litotipo Argille Varicolori. In grigio sono rappresentate le aree classificate come «frane», in bianco quelle di «non frane». Si evidenzia bene un'area a sud-ovest, che nelle precedenti analisi era stata registrata come area con un minor grado di umidità e un minor grado di suolo nudo. È quindi possibile affermare che anche scendendo in un maggior dettaglio della classificazione questa è risultata molto valida e che il risultato ha trovato anche un buon riscontro teorico. Anche qui viene proposta la carta che mostra la probabilità di ogni *pixel* di appartenere alla classe «frane» (fig. 12). Sovrapponendo il disegno delle frane in atto (fig. 3), si evince l'ottima corrispondenza dei risultati avuti con le frane realmente esistenti.

Fig. 11 – *Bacino del Basento. Classificazione delle Argille Varicolori in classi «frana» e «non frana»*

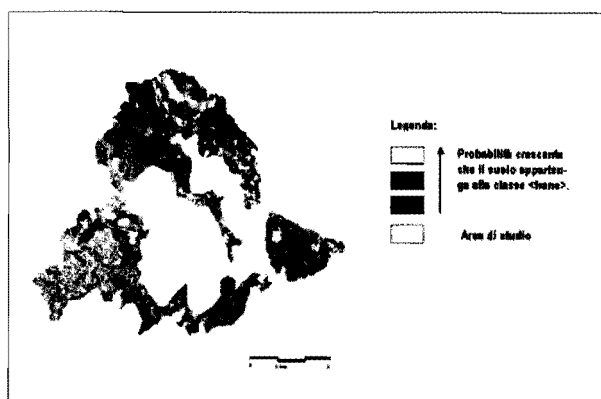
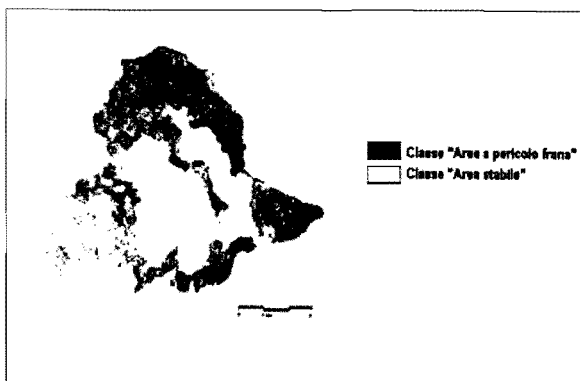


Fig. 12 – *Bacino del Basento. Probabilità dei terreni ad Argille Varicolori di appartenere classe «frana»*

La bontà dei risultati ottenuti è mostrata ancora una volta dalle matrici di confusione. La matrice di confusione sulle aree di calibrazione (tab. 4) ha prodotto un risultato di efficienza globale pari al 68,13%, mentre la matrice di confusione (tab. 5) sulle aree di *test* ha avuto un'efficienza del 73,41%.

Paradossalmente, in questo caso è risultata migliore l'efficienza nelle aree di *test* che quella nelle aree di calibrazione, anche se di poco. Ciò è dovuto alla scelta arbitraria degli insiemi. In questo caso tutti i risultati sono un po' meno buoni dei risultati avuti nel processo di classificazione fatto su tutto il bacino; è prevedibile che quanto maggiormente si scenda nel dettaglio tanto più sia difficile trovare risultati pienamente soddisfacenti.

Vale la pena di osservare che questo risultato, esportato in una regione della quale non si ha alcuna informazione, permette di interpretare il territorio con un'informazione aggiuntiva rispetto a quelle che possono derivare dalle classiche prove deterministiche.

È parso quindi interessante effettuare questo tipo di verifica su un altro litotipo molto franoso: la Formazione del Flysch Galestrino. Su questa classe è stata effettuata un'ulteriore classificazione, mascherando quindi tutte le altre formazioni geologiche. Anche in questo caso si è provveduto alla scelta di nuove aree stabili per la fase di calibrazione e per la fase di verifica. Le aree di frana sono ovviamente sempre le frane note. Per quanto riguarda le aree di «non frana», sia per il *training set* sia per il *test set* sono state individuate delle nuove aree all'interno del solo Flysch Galestrino, cercando sempre di individuare aree che abbiano caratteristiche peculiari di non franosità, ovvero che abbiano un

Tab. 4 – *Verifica dei risultati (matrice di confusione) del training effettuato sui suoli ad Argille Varicolori nel bacino del Basento*

	<i>Training «Frane»</i>	<i>Training «No frane»</i>
Classe «Frane»	68,10	31,77
Classe «No frane»	31,90	68,23
<i>Totale</i>	<i>100,00</i>	<i>100,00</i>

Tab. 5 – *Verifica dei risultati (matrice di confusione) del test effettuato sui suoli ad Argille Varicolori nel bacino del Basento*

	<i>Test «Frane»</i>	<i>Test «No frane»</i>
Classe «Frane»	74,55	29,53
Classe «No frane»	25,45	70,47
<i>Totale</i>	<i>100,00</i>	<i>100,00</i>

Tab. 6 – *Verifica dei risultati (matrice di confusione) del training effettuato sui suoli a Flysch Galestrino nel bacino del Basento*

	<i>Training «Frane»</i>	<i>Training «No frane»</i>
Classe «Frane»	64,98	21,32
Classe «No frane»	35,02	78,68
<i>Totale</i>	<i>100,00</i>	<i>100,00</i>

Tab. 7 – *Verifica dei risultati (matrice di confusione) del test effettuato sui suoli a Flysch Galestrino nel bacino del Basento*

	<i>Test «Frane»</i>	<i>Test «No frane»</i>
Classe «Frane»	58,38	21,44
Classe «No frane»	41,62	78,56
<i>Totale</i>	<i>100,00</i>	<i>100,00</i>

Tab. 8 – *Superfici di frana e grado di franosità secondo litotipo, nel bacino del Basento*

Formazione	Superficie (%)	Indice di franosità
Formazione delle Argille Varicolori	42,7	10,7
Flysch Galestrino	34,7	8,6
Flysch rosso (marnoso-argilloso)	13,3	3,3
Formazione di Corleto Perticara	5,2	1,3
Altre	4,0	1,0
	<i>100,00</i>	

Fig. 13 – Bacino del Basento. Classificazione del Flysch Galestrino in classi «frana» e «non frana»

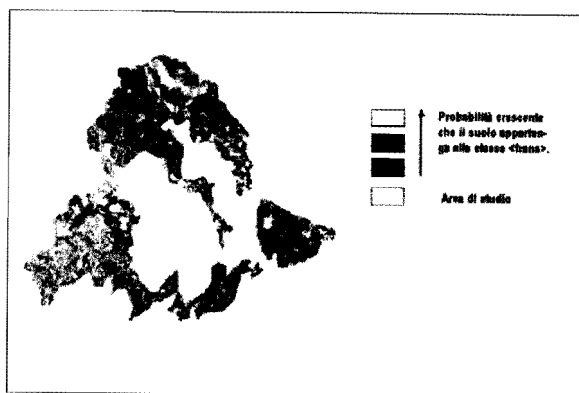
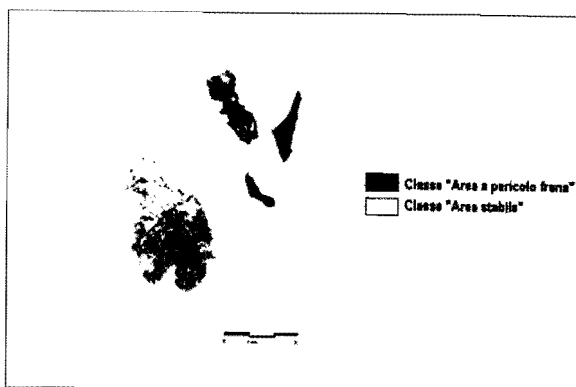


Fig. 14 – Bacino del Basento. Probabilità dei terreni a Flysch Galestrino di appartenere alla classe «frana»

buon grado di separabilità dalle aree in frana, e che siano dimensionalmente simili alle aree in frana. Il risultato della classificazione nel solo Flysch Galestrino è mostrato in figura 13, dove, come nelle classificazioni precedenti, in grigio sono rappresentate le aree classificate come «frana», in bianco quelle di «non frana». Nell'immagine risulta ben evidente un'area a nord in cui dovrebbe essere minore il pericolo di frana. Come per l'elaborazione precedente, a sua volta la figura 14 riporta la probabilità di frana e il confronto con le frane realmente esistenti.

L'attendibilità di questo risultato è, come al solito, mostrata dalle matrici di confusione. La matrice di confusione sulle aree di calibrazione ha prodotto un risultato di efficienza globale pari al 68,78% (tab. 6); quella sulle aree di verifica ha avuto un'efficienza del 67,23% (tab. 7).

Nella matrice sulle aree di *training* (tab. 6) risultano individuate abbastanza bene le aree di «non frana» e il classificatore ha riconosciuto meno bene le aree di «frana». Rispetto alle aree di *test* (tab. 7) i risultati sono un po' meno buoni dei risultati avuti nel processo di classificazione fatto sulle Argille Varicolori, ma rimangono significativi.

Nel suo insieme, il processo di classificazione ha confermato una buona correlazione delle frane con la litologia, ha mostrato una correlazione delle frane con gli indici utilizzati, l'indice MIRI e l'NDVI, e in ultimo con la carta delle pendenze.

È tuttavia un problema ancora aperto capire fino a che punto siano affidabili questi indicatori, quale sia il loro grado di correlazione con la reale situazione al suolo, e quindi se segnalino in qualche modo il movimento franoso. Solo un monitoraggio di questi

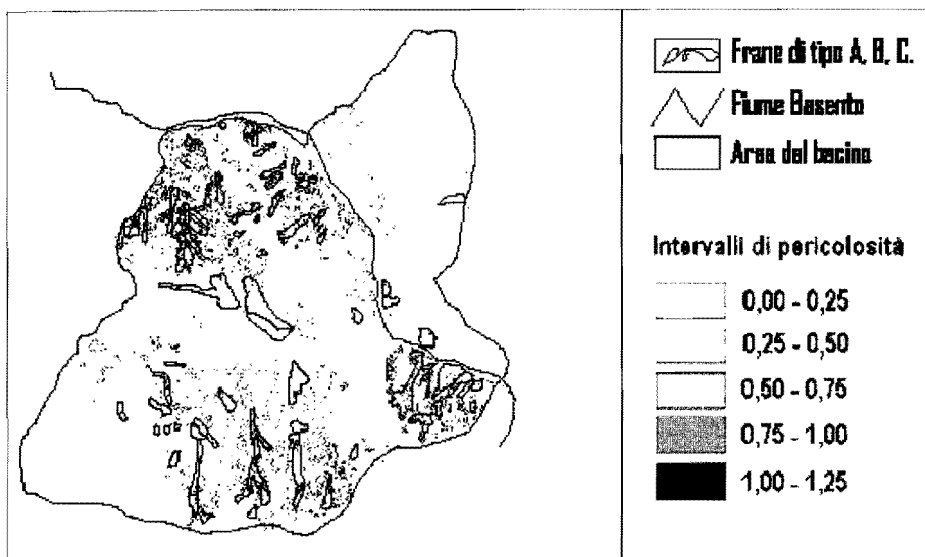


Fig. 15 – Bacino del Basento. Carta della pericolosità dei suoli in ordine alla franosità, con indicazione delle frane rilevate

valori, un'analisi multitemporale, una verifica al suolo, contemporanea ai dati che arrivano da satellite, e un raffronto di questi dati con le velocità di deformazione del terreno possono dare una risposta chiara a queste domande.

Il fine ultimo di questo studio (per il quale sarebbero fondamentali i passaggi appena elencati) è l'elaborazione di mappe di pericolosità, e quindi di rischio, che facilitino la lettura del territorio e aiutino la prevenzione. Qui è stato elaborato un primo tentativo di visualizzazione delle aree più sensibili sotto forma di carta di pericolosità (fig. 15), generata attraverso le carte di probabilità prodotte dalla classificazione. In particolare sono state considerate le carte di probabilità di appartenenza alla classe «frana» nell'area delle Argille Varicolori e in quella del Flysch Galestrino. Queste carte sono state poi sovrapposte e amplificate, ognuna secondo il suo indice di franosità (tab. 8).

L'ultima colonna della tabella 8 riporta il grado di franosità, proporzionale alla percentuale del litotipo che compone la frana ⁽²⁾:

$$x_{fi} = a_{1i} \cdot x_{1i} + a_{2i} \cdot x_{2i} \quad \forall i \in X \quad (1)$$

dove x_{fi} è il singolo *pixel* della matrice somma, x_{1i} e x_{2i} sono i *pixels* delle carte di probabilità di appartenenza alla classe frane rispettivamente per le Argille Varicolori e per il Flysch Galestrino, a_{1i} e a_{2i} sono i coefficienti secondo cui va amplificato ogni contributo, X è l'insieme dei *pixels* che compongono l'immagine. Essendo solo due i terreni presi in considerazione in questa analisi, sarà il contributo delle Argille Varicolori a essere amplificato secondo il rapporto delle percentuali nella prima colonna nella tabella 8. Quindi:

(2) Questa analisi permette di capire quale indice di franosità corrisponde a ogni litotipo: valore che potrà essere utilizzato sia nel processo di classificazione, per creare uno degli indicatori in entrata del processo di classificazione, sia a valle dello stesso, nel tentativo di dare un peso diverso a ogni litotipo nella ricerca delle aree più a rischio.

$$a_{1i} = \frac{42,7}{34,7} = 1,23; \quad a_{2i} = 1.$$

Ad ogni x_i viene assegnato un peso di pericolosità in relazione al litotipo di appartenenza. Il risultato è la carta della pericolosità. Più in generale, la relazione (1) potrebbe essere estesa a più di due terreni; in tal caso dovrebbe essere individuato un indice per ogni terreno.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BENCARDINO M., *Contributo delle immagini satellitari allo studio della franosità di un bacino*, Università di Napoli «Federico II», Tesi di laurea in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio, a.a. 2002-2003.
- CALTAGIRONE F. e altri, *Cosmos-Skymed Program: Status and Perspectives*, in *Proceedings of the Third International Workshop on Satellite Constellations and Formation Flying* (Pisa, 24-26 febbraio 2003), Haifa, Asher Space Research Institute (ASRI), 2003, pp. 11-16.
- CECCARELLI M. e altri, *Un metodo per la valutazione automatica della pericolosità geomorfologica: un caso di studio e confronti*, in *Atti della 5a Conferenza ASITA (Rimini, 2001)*, Rimini, ASITA, 2001, I, pp. 483-487.
- COLEMAN T.L. e O.L. MONTGOMERY, *Soil Moisture, Organic Matter, and Iron Content Effect on the Spectral Characteristics of Selected Vertisols and Alfisols in Alabama*, in «Photogrammetric Engineering and Remote Sensing», Bethesda, 1987, pp. 1659-1663.
- DESSENA M.A., *Applicazioni di tecniche di telerilevamento per stime di bilancio idrico*, in *Settima Conferenza Nazionale delle Agenzie Ambientali* (Milano, 24-26 novembre 2003) (consultabile in <http://www.arpalombardia.it/new/live/7conferenza/atti/index.htm>).
- GUIDA D. e G. IACCARINO, *Fasi evolutive delle frane di tipo colata nell'alta valle del F. Basento (Potenza)*, in «Studi Trentini di Scienze Naturali. Acta Geologica», Trento, 1991, pp. 127-152.
- HENDRICKX J.M.H., *Determination of Hydraulic Soil Properties*, in M.G. ANDERSON e T.P. BURT (a cura di), *Process Studies in Hillslope Hydrology*, Londra, Wiley, 1990, pp. 43-92.
- HERVÀS J. e altri, *Monitoring Landslides from Optical remotely Sensed Imagery: The Case History of Tessina Landslide, Italy*, in «Geomorphology», Amsterdam, 2003, pp. 63-75.
- IALIBERTE A.S. e altri, *Stream Change Analysis using Remote Sensing and Geographic Information Systems (GIS)*, in «Journal of Range Management», Lakewood, 2001, 54, pp. A22-A50.
- MANUNTA P. e altri, *Sommario Esecutivo Progetto SLAM (Servizio Monitoraggio Frane)*, Frascati, Consorzio SLAM (ESA), 2002, relazione tecnica.
- MUSICK B.B. e PELLETIER R.E., *Response to Soil Moisture of Spectral Indexes derived from Bidirectional Reflectance in Thematic Mapper Wavebands*, in *22th International Symposium on Remote Sensing Environment* (Abidjan, 20-26 ottobre 1988), Ann Arbor, Environmental Research Institute of Michigan, 1988, I, pp. 167-184.
- ODAJIMA T. e altri, *Gis and Remote Sensing Based Analysis of Landslide Hazards in Cianjur, West Java, Indonesia*, in «ITTT [Institute for Transfer of Industrial Techno-

- logy] International Symposium on Application of Remote Sensing and GIS for Disaster Reduction», Tsukuba, 1998, pp. 185-190.
- PATANAKANOG B., *Landslide Hazard Potential Area in 3 Dimension by Remote Sensing and GIS Technique*, in «Asian Conference on Remote Sensing 2002» (Bangkok, 2002) (consultabile in <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2002/pos3/049>).
- PELLIGRINO A. e altri, *Kinematic Features of Earthflows in Southern Italy*, in *Landslides in Research, Theory and Practice*, Londra, Thomas Telford, 2000, pp. 1196-1202.
- RÖSSNER S. e altri, *Satellite Remote Sensing for Regional Assessment of Landslide Hazard in Kyrgyzstan (Central Asia)*, in «Fernerkundung und Naturkatastrophen», *Zweite Forum Katastrophenvorsorge* (Lipsia, 24-26 settembre 2001), Potsdam, Geoforschungszentrum, 2001, pp. 433-441.
- SHEETS K.R. e J.M.H. HENDRICKX, *Noninvasive Soil Water Content Measurement using Electromagnetic Induction*, in «Water Resources Research», Washington, 1995, pp. 2401-2409.
- SHIH S.F. e J.D. JORDAN, *Landsat Mid-infrared Data and GIS in Regional Surface Soil Moisture Assessment*, in «Water Resources Bulletin», Middleburg, 1992, pp. 713-719.
- SINGHROY V.H., J.E. LOEHR e A.C. COREA, *Landslide Risk Assessment with High Spatial Resolution Remote Sensing Satellite Data*, in «IGARSS 2000. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium» (Honolulu, 24-28 luglio 2000), Honolulu, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000, VI, pp. 2501-2503.
- VAN WESTEN C.J., L. MONTOYA e L. BOERBOOM, *Multi-hazard Risk Assessment using GIS in Urban Area: A Case Study for the City of Turrialba (Costarica)*, in «Regional Workshop on Best Practices in Disaster Mitigation (Bali, 24-26 settembre 2002)», Enschede, ITC-International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2002, pp. 89-91.
- VAN WESTEN C.J., S. WUNDERLE e P. PASQUALI, *Integration of Remote Sensing Techniques with Statistical Methods for Landslide Monitoring and Risk Assessment*, in «EGS [European Geophysical Society] XXVII General Assembly on Landslide Risk Assessment and Mapping» (Nizza, 21-26 aprile 2002) (consultabile in http://dup.esrin.esa.int/files/project/192-106-252-100_200415131610.pdf).

LANDSLIDE HAZARD ASSESSMENT IN A DRAINING AREA OF THE BASENTO RIVER (ITALY) USING REMOTE SENSING AND GIS TECHNIQUE. – The aim of this work is the elaboration of hydro-geological risk assessment maps through the fusion of satellite and cartographic data. This analysis aims at offering a method for a first approach that enables to locate the greater risk assessment areas through an automatic classification of the areas themselves. Studies of theoretical organization on this matter have underlined the importance and the utility of both the SAR and optical images for a detailed study in order to integrate the methods for the location of the risk assessment areas. If aerophotogrammetry is essential for the landslide recognition and field survey is irreplaceable, the satellite images add information and knowledge to the landslide map elaboration.

Università del Sannio, Dipartimento di Scienze Geologiche ed Ambientali

mbencard@unisannio.it