

Mappatura multitemporale delle superfici di erosione del suolo da dati telerilevati

Sergio Lo Curzio (*) & Filippo Russo (*)

(*)Dipartimento di Studi Geologici e Ambientali, Università degli Studi del Sannio, Via dei Mulini 59/A – 82100 Benevento. Tel. 0824-323657, fax: 0824-23013, e-mail: locurzio@unisannio.it

Riassunto

Lo scopo di questo studio è l'identificazione e la mappatura a scala bacinale delle evidenze geomorfologiche di erosione del suolo desunte dai dati Landsat integrati con la fotointerpretazione delle ortofoto digitali a colori ed i rilievi in campo. L'area di studio misura 228.6 Km² e comprende il bacino del Fiume Saccione situato a ridosso dei limiti amministrativi di Puglia e Molise.

Il primo passo dello studio è stata la caratterizzazione dell'area con la digitalizzazione della carta litologica, pedologica e dell'uso del suolo derivate da dati di letteratura. Poi le immagini telerilevate sono state co-registrate per mezzo di punti di controllo a terra (GCPs) ed elaborate con il software RSI ENVI 4.4. Successivamente il dataset è stato sottoposto a tecniche di enfattizzazione quali contrast stretching, Principal Component Analysis (PCA), decorrelation stretching e composizioni a falsi colori. Il rilevamento in campo ha permesso di caratterizzare gli elementi geomorfologici individuati sulle immagini. Particolare attenzione è stata rivolta alle superfici soggette ad erosione idrica (SeS) del suolo localizzate in campo attraverso l'utilizzo di un GPS. Nel passo successivo sono state delimitate le regioni di interesse (ROI) sui dati Landsat e sulle SeS è stata effettuata un'analisi statistica dei valori dei pixel (DN) racchiusi nella ROI per determinare il comportamento della risposta spettrale. L'intero dataset è stato sottoposto ad un processo di classificazione con l'algoritmo a massima verosimiglianza (ML).

Sulla base delle classificazioni effettuate sui dati Landsat del 1992, 1999, 2000, 2001 e 2004, sono state create le carte delle SeS per ciascun anno considerato. Tutte le carte sono state sottoposte a tecniche per la stima dell'accuratezza. Infine, è stata effettuata un'analisi spaziale in un software GIS in modo da registrare il cambiamento di forma e posizione delle SeS e per correggere gli errori attraverso opportune tecniche di filtraggio.

Inoltre, il confronto tra immagini Landsat acquisite in stagioni diverse ha evidenziato la presenza di SeS nei periodi estivi e quindi indicativi di pratiche agricole non conservative.

Abstract

The aims of this study are the assessment of the multitemporal spatial distribution and the basinal mapping of the soil erosion geomorphological evidences desumed by integration of Landsat ETM 7+ data, interpretation resultances of panchromatic color orthophotos and geomorphological surveyed data. These latter ones are consisting of recognition of landsurfaces interested by areal (sheet and solifluxion processes) and linear (rill and gully erosion) erosional landforms (SeS). The study has been performed in the Saccione river basin (North Apulia), wide 228.6 km², located in southern Italy. The first step of the study has been the digital thematic mapping of lithological, pedological and land-use features coming from literature data and characterizing the studied area. Then, the whole remotely sensed dataset regarding the studied area was co-registered and processed using the RSI ENVI 4.4 software. For the registration of the first Landsat image (master image), ground control points (GCPs) were collected by GPS measurements. The other images (slave images) were co-registered by GCPs image-to-image registration. The dataset was

processing by application of contrast stretching, Principal Component Analysis (PCA), decorrelation stretching and RGB false colour compositing techniques. A field survey was carried out to characterize the geomorphological features detected on the imagery. Particular attention was given to the SeS, which were located using a GPS. In the second step have been delimited the Regions of Interest (ROI) on the Landsat ETM 7+ imagery, i.e. polygons representing the “ground-truth” related to the several land cover class occurring in the imagery. A simple statistical analysis was then conducted on the digital number (DN) values of the pixels enclosed in the ROI of the Els class to determine their spectral response pattern. The whole image dataset has been then classified using a maximum likelihood classification algorithm.

The SeS distribution maps of 1992, 1999, 2000, 2001 and 2004 years were generated respectively based on the classification results. The results of the classification process have been checked in the field and by photointerpretation on the base of random sampling. Finally, a spatial analysis was performed to temporal monitoring of the SeS shape and location. The field survey and the image processing have allowed to highlight that some classified Els-like “objects”, even if showing the same spectral response, could not be SeS: this confirm the strategic importance of the field checking on the semi-automatically produced data. These mistaken “objects” have been deleted during the production of the multitemporal mapping of the Els, as a final result of the study.

Furthermore, the comparison between seasonal different Landsat data of the same area has clearly evidenced the presence of SeS during the end of the summer period. Such results, verified in the field, are connect with bad and non conservative agricultural practices, suggesting that these practices could play an important role as triggering of erosional processes and their evolution.

Introduzione

Attualmente, il fenomeno dell'erosione del suolo rappresenta, purtroppo, il principale problema di *land degradation* a scala globale [Eswaran et al., 2001]. E' ormai accertato che gli effetti negativi dei processi di erosione del suolo sulla produzione agricola, sulle infrastrutture e sulla qualità delle acque creano, da un lato, un notevole impatto ambientale e, dall'altro, arrecano gravi danni economici [Pimentel et al., 1995; Lal, 1998]. Lo sviluppo di linee programmatiche per la conservazione del suolo richiede una valutazione dell'erosione a scala regionale [Vrieling, 2006]. In tale ottica, tuttavia, un'importante limitazione è rappresentata dalla disponibilità e dalla qualità dei dati [Van Rompaey e Govers, 2002]. Il Telerilevamento è in grado di fornire dati omogenei relativi ad ampie aree e può perciò contribuire in maniera estremamente efficace alla valutazione dell'erosione su scala regionale [King e Delpont, 1993; Siakeu e Oguchi, 2000]. I dati satellitari possono essere utilizzati sia per l'individuazione di singole forme di erosione che per quella di intere aree soggette ai processi erosivi. Nel primo caso, tuttavia, le risoluzioni spaziali offerte da immagini satellitari tipo Landsat o SPOT consentono al massimo il riconoscimento di singoli *gullies* di medie o grandi dimensioni e risultano, pertanto, di limitata utilità [Millington e Townshend, 1984]; al contrario, queste immagini possono essere efficacemente utilizzate per lo studio di aree soggette ad erosione diffusa [Vrieling, 2006]. E' noto che i processi erosivi asportano gli orizzonti pedologici di superficie (*topsoil*) caratterizzati da una risposta spettrale influenzata da diverse proprietà del suolo, quali la tessitura, il contenuto in sostanza organica, l'umidità, gli ossidi di ferro e i minerali presenti [Escadafal, 1994]. L'asportazione del *topsoil* esuma i sottostanti orizzonti profondi (*subsoil*) caratterizzati da contenuti minori di sostanza organica ed ossidi di ferro e, quindi, da una differente risposta spettrale che rende le aree erose facilmente individuabili su immagini satellitari [De Jong et al., 1999].

Nella presente nota sono illustrate non solo le relazioni tra paesaggi erosionali e loro espressione spettrale [Lo Curzio 2009], con particolare riferimento alle relazioni tra la riflettanza di superfici erose e gli aspetti geomorfologici complessivi del paesaggio investigato, ma anche la loro evoluzione temporale. Lo studio è stato condotto su un'area dell'Italia meridionale, al confine tra Molise e Puglia, a forte vocazione agricola e caratterizzata da una combinazione di aspetti geografico-fisici che la rendono particolarmente vulnerabile all'azione dei processi erosivi. Il lavoro

ha consentito di realizzare una cartografia tematica *ad hoc* delle superfici erose, che rappresenta un primo e fondamentale risultato per la valutazione ed il monitoraggio degli effetti dei processi erosivi nell'area di studio.

Inquadramento geografico dell'area

L'area di studio (fig. 1), a drenaggio adriatico, è ubicata al confine tra il Molise e la Puglia e ricade nel bacino idrografico del Torrente Saccione; le quote sono comprese tra 30 e 320 m s.l.m. e la sua estensione è di 228,6 Km².

Il substrato dell'area [Boni et al., 1969] è prevalentemente costituito da argille marnose grigio-azzurre aventi età Pliocene medio-(?) Calabriano. Su tali terreni poggiano in discordanza depositi

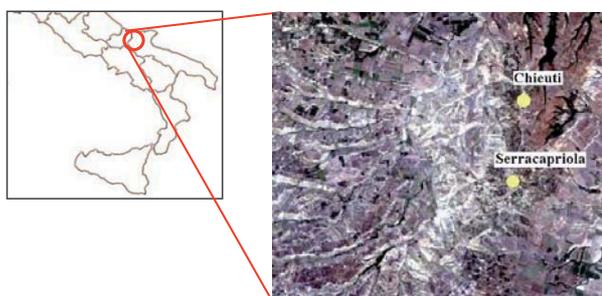


Fig. 1 - Ubicazione dell'area di studio

fluviali e fluvio-lacustri di età pleistocenica, costituiti da ghiaie più o meno cementate; i più antichi di tali depositi contengono livelli lentiformi travertinosi, argilloso-sabbiosi e sabbiosi. Il quadro litologico è completato da depositi alluvionali prevalentemente argilloso-limosi, di età alto-pleistocenica.

Da un punto di vista geomorfologico, l'area è prevalentemente collinare e dominata da versanti dolci ed irregolari

impostati sul substrato argilloso pliocenico. A luoghi il rilievo culmina in piccole superfici sub-pianeggianti di origine erosionale. I versanti si raccordano, verso valle, al più antico ed altimetricamente più elevato di tre ordini di terrazzi impostati sui depositi fluviali e fluvio-lacustri pleistocenici; le quote di tali terrazzi sono comprese tra 20 e 200 m s.l.m.

Sotto l'aspetto pedologico (Servizio Cartografico Regione Puglia, 2002), l'area di studio è caratterizzata da due tipologie di suoli dominanti: nell'area di fondovalle predominano suoli con proprietà vertiche fortemente espresse, a tessitura fine, molto calcarei, con *topsoil* di colore bruno oliva che rientrano nei Chromic Calcixererts fini misti termici secondo la *Soil Taxonomy* [USDA, 1998]. Nella parte medio-alta dei versanti predominano invece suoli caratterizzati da un orizzonte superficiale di accumulo di sostanza organica umificata, di colore bruno scuro; questi suoli sono molto calcarei, hanno tessitura fine e rientrano nei Typic Calcixerolls fini misti termici secondo la *Soil Taxonomy* [USDA, 1998].

Gli usi del suolo prevalenti nell'area di studio sono: i seminativi, nelle parti medio-alte dei versanti, e le colture foraggere permanenti, in quelle medio-basse.

Materiali e metodi

Per la realizzazione di questo studio sono stati utilizzati i *software* RSI ENVI 4.0, per la gestione e l'elaborazione dei dati satellitari, ed ArcViewGIS 9.0, per la parte relativa al GIS e per la realizzazione delle cartografie tematiche telerilevate. I dati satellitari utilizzati sono rappresentati dalle immagine Landsat acquisite nel periodo 1992-2004 (tab. 1).

N.	SATELLITE	SENSORE	SCENA	DIMENSIONE PIXEL (m)	DATA DI ACQUISIZIONE
1	Landsat 7	ETM+	189-031	30x30	16/08/1999
2	Landsat 7	ETM+	189-031	30x30	18/08/2000
3	Landsat 7	ETM+	189-031	30x30	05/08/2001
4	Landsat 7	ETM+	189-031	30x30	21/06/2002
5	Landsat 7	ETM+	189-031	30x30	29/08/2004

Tab. 1 - Dati satellitari utilizzati e relative caratteristiche.

Sono stati utilizzati, quali dati ancillari: ortofoto digitali a colori (scala nominale 1:10000), Carta geologica - Foglio n. 155 – S. Severo [Servizio Geologico d'Italia, 1969], Carta dei suoli della Regione Puglia [Servizio Cartografico Regione Puglia, 2002] e tavolette topografiche IGMI 155-III-NE e 155-III SE, oltre a dati rilevati direttamente in campo.

Le scene Landsat sono state sottoposte ad un pre-processing allo scopo di rimediare agli errori dovuti alle distorsioni introdotte durante l'acquisizione e la trasmissione dei dati. Si è proceduto, *in primis*, alla co-registrazione dei dati satellitari con la metodologia definita dei *Ground Control Points* o GCPs (punti di controllo a terra). Per questa fase sono state utilizzate le ortofoto digitali a colori a scala nominale 1:10.000 e con risoluzione spaziale di 1 metro (fonte: Portale Cartografico del Ministero dell'Ambiente), già georeferenziate nel sistema di riferimento UTM *datum* WGS84 fuso 33 N. Su queste ortofoto sono state ricavate le coordinate geografiche di alcuni oggetti in esse rappresentati, le quali sono state poi associate agli omologhi presenti nell'immagine satellitare. Il software utilizzato per le elaborazioni dei dati satellitari è stato ENVI 4.0 della RSJ.

Dopo aver selezionato i GCPs (21 punti utili nell'immagine del 2004) si è passati alla procedura di *registrazione* dell'immagine con creazione di un database all'interno del software ENVI relativo ai GCPs selezionati.

La registrazione dell'immagine consta di due fasi: *warp* (deformazione) e *resampling* (ricampionamento) che il software realizza in un unico passo. La prima azione (*warp from GCPs: image to map*) ha lo scopo di adattare l'immagine satellitare grezza alle coordinate geografiche attribuitegli con i GCPs e di restituire agli oggetti le dimensioni reali in scala. Per poter fare questo si necessita di una *matrice di trasformazione*. La seconda fase ha l'obiettivo di ricostruire, per i pixels dell'immagine deformata, il contenuto radiometrico originario.

Il *warp*, per la registrazione del dato Landsat, è stato effettuato con un algoritmo polinomiale di primo grado, funzionale all'elaborazione delle immagini georeferenziate con un numero limitato di GCPs. Per il *resampling* è stato applicato l'algoritmo *nearest neighbour*, il quale lascia invariato il valore radiometrico del pixel, ricampionando tutti i dati a 30 m.

La prima immagine registrata, quale immagine di riferimento o *master*, è stata quella del 1999 perché dello stesso anno delle ortofoto digitali. L'errore quadratico medio (RMSE) sui GCPs è risultato essere 0.27 pixel (quindi pari a 8.1 m per un pixel di 30 m). Successivamente sono state co-registrate tutte le altre immagini (*slaves*) per ottenere perfette sovrapposizioni con l'immagine di riferimento attraverso un processo di registrazione *image-to-image*. La registrazione è stata effettuata per coppie di immagini (*master-slave*).

I passaggi procedurali e i tipi di algoritmi di trasformazione e *resampling* utilizzati per tutti i dati sono stati i medesimi di quelli applicati alla Landsat del 1999. L'unica differenza è che la selezione dei GCPs è avvenuta attraverso l'individuazione di uno stesso oggetto riconosciuto su entrambe le immagini della coppia *master-slave* (immagine già registrata-immagine da registrare). Per le co-registrazioni *image to image* l'RMSE è risultato sempre al di sotto di 0.25 pixel. Infine, per ottenere una coerenza dimensionale, tale da rendere le immagini sovrapponibili, è stato necessario operare un ridimensionamento (*resize*) su tutti i dati Landsat mediante una matrice di valore 2350x2138 pixel.

Di fondamentale importanza sono stati i rilievi diretti sul campo che hanno permesso di validare gli oggetti riconosciuti per via indiretta e fare considerazioni sullo stato delle superfici analizzate e sui processi morfodinamici agenti (fig. 2). Tali rilevamenti sono stati facilitati per quanto riguarda la posizione e l'identificazione degli oggetti dall'utilizzo del GPS.



Fig. 2 – Esempi di processi morfodinamici erosivi di versante rilevati in campagna. Nella figura si rilevano un chiarissimo esempio di erosione a solchi ed ampi tratti di versante denudato da fenomeni di creeping.

Classificazione multitemporale delle superfici di erosione del suolo

A questo punto, il *software* utilizzato (ENVI 4.4) per l’analisi dell’immagine multispettrale ci ha permesso di delimitare le porzioni dell’immagine relative alle superfici soggette ad erosione mediante poligoni denominati Regioni d’Interesse (ROI). Questi poligoni rappresentano la “verità a terra” e racchiudono i pixel le cui caratteristiche spettrali contraddistinguono le superfici di erosione (fig. 4); all’interno di queste regioni sono state estrapolate le statistiche dei valori digitali dei pixel, in modo da delineare le caratteristiche spettrali di massima delle superfici individuate (fig.5).

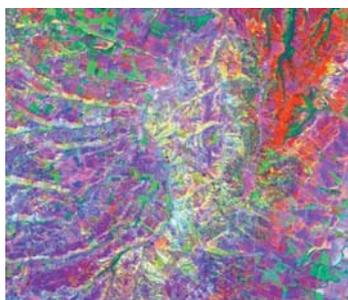


Fig. 3 – Immagine composta in falsi colori RGB della Decorrelation Stretching.

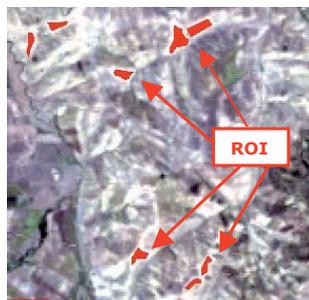


Fig. 4 – Regioni di interesse (ROI) delle superfici soggette a fenomeni di erosione sul dato Landsat.

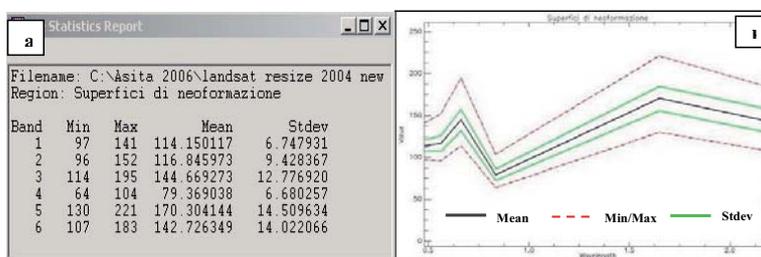


Fig. 5– Dati spettrali statistici relativi alle superfici di erosione individuate. a) Tabella con i valori statistici dei DN all’interno delle ROI; b) profili spettrali caratteristici per tali valori statistici.

Successivamente, si è proceduto alla classificazione dell'immagine con classificatore Maximum Likelihood per produrre una carta delle coperture del suolo dell'area di studio per ogni anno di acquisizione. Le aree vegetate sono state classificate in: Bosco, Prato, Campi coltivati e Oliveti. Particolare attenzione è stata data al suolo nudo e alla sua porzione affetta da evidenti fenomeni erosivi (Superfici erose), oggetto principale del processo di classificazione. Infatti, la presenza di suolo nudo può essere usata come indicazione dell'esistenza di processi attivi di erosione (nel nostro caso tali processi sono: sheet erosion, gully erosion e frane) indipendentemente dalla condizione litologica [Beguiria, 2006].

Il suolo nudo è stato diviso in cinque classi, elencate nella Tabella 1, in base alla differente risposta spettrale. Alle classi Superfici erose 1 e 2 è stato assegnato un valore di *threshold* pari a 0,05. Questo valore è stato stimato utilizzando le *Rule Images* generate da una preventiva classificazione senza *threshold*. Le *Rule Images* per la classificazione a massima verosimiglianza rappresentano immagini di probabilità che ogni classe utilizzata possiede ai fini della classificazione. I valori di *threshold* utilizzati nella classificazione sono stati determinati dall'istogramma delle *Rule Images*.

Tali superfici, così classificate, sono state convertite in formato vettoriale ed esportate nel *software* GIS con il quale si è proceduto alla verifica dell'attendibilità del dato classificato ed alla creazione delle carte finali (fig. 6).

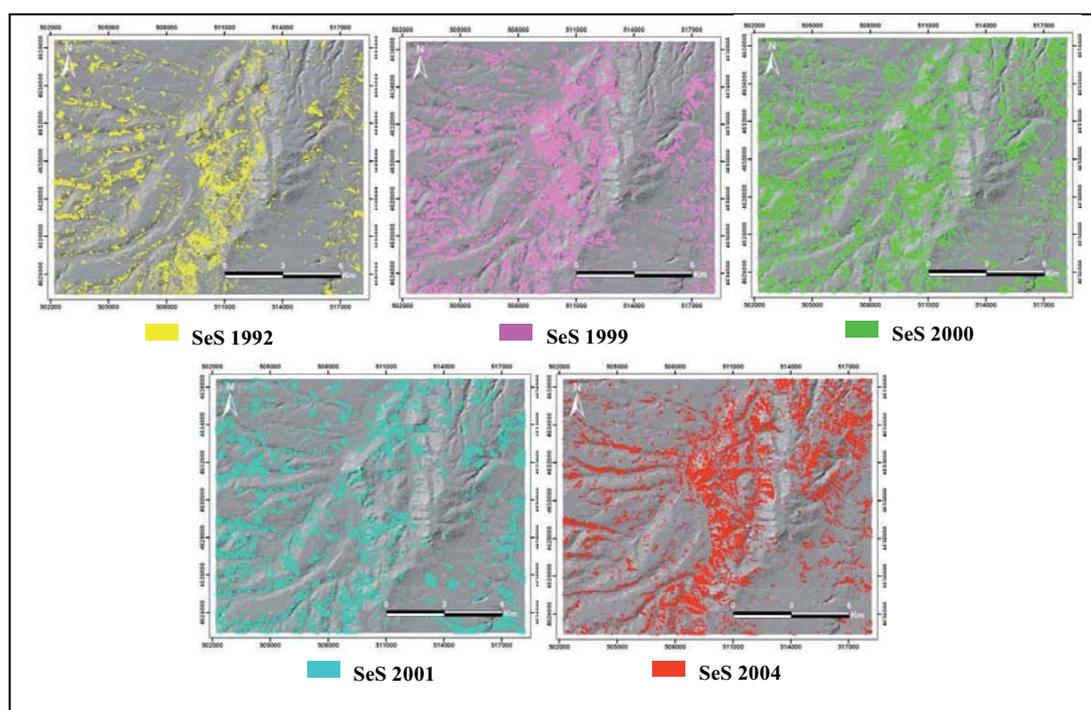


Fig. 6 – Carte delle superfici soggette ad erosione idrica del suolo derivate dalla classificazione delle immagini Landsat del 1992, 1999, 2000 e 2001 e 2004

L'accuratezza della classificazione è stata stimata attraverso la matrice di confusione. La *Overall Accuracy* (OA) è risultata sempre superiore a 94 %, mentre il coefficiente *K* è risultato 0,93. Inoltre, pero ogni anno classificato è stata determinata la *Producer's Accuracy* (PA) e la *User's Accuracy* (UA) di tutte le classi e in particolare per le classi che rappresentano le aree soggette a erosione.

Esposizione dei risultati e considerazioni finali

L'applicazione delle metodologie precedentemente descritte ha permesso di elaborare, come risultato finale, la mappatura multitemporale delle superfici di erosione [Lo Curzio, 2006] nell'area di studio (fig. 6). Nella Carta, le superfici soggette a fenomeni erosionali, prodotte da processi erosivi sia di tipo gravitativo (frane e soliflussi) che connessi all'azione, lineare e diffusa, delle acque di ruscellamento superficiale, sono evidenziate con colori differenti per ogni anno di acquisizione dei dati Landsat ed hanno una tipica distribuzione a "macchia di leopardo". Una tale configurazione è giustificata dalla caratteristiche geologiche e geomorfologiche del territorio dell'area di studio. Infatti, le zone soggette a maggior erosione sono concentrate in corrispondenza delle maggiori acclività del locale rilievo (versanti ed impluvi) e/o dell'affioramento di litotipi particolarmente erodibili o in condizioni morfotopografiche che favoriscono la loro erodibilità. Tra queste ultime, particolare risalto va attribuito a quelle situazioni, anche antropogeniche, legate all'uso del suolo o all'adozione di pratiche agricole non conservative. Quest'ultima asserzione è dimostrata dal raffronto tra l'immagine Landsat dell'area di studio acquisita nel mese di giugno e quella acquisita in agosto (fig. 7): nell'immagine di giugno, le superfici soggette a fenomeni erosionali sono assenti o, al più, obliterate dalle pratiche agricole, soprattutto dalle colture nel massimo sviluppo vegetativo; al contrario, nell'immagine di agosto dette superfici appaiono con tutta evidenza essendo il suolo spoglio e significativamente aggredito dai processi erosionali. Più in generale, però, la verifica diretta sul campo ha consentito di confermare il complesso delle deduzioni in quanto è emerso che effettivamente le superfici cartografate come superfici di erosione sono caratterizzate da evidenti segni di soliflussione, erosione idrica lineare e diffusa, nonché interessate da fenomeni franosi di varia tipologia. Ciò emerge anche dai confronti effettuati tenendo conto dei dati ancillari e particolarmente da quelli di natura geologica e pedologica. Infatti, confrontando la distribuzione delle superfici di erosione o neoformazione con i dati geologici e pedologici emerge che dette superfici sono impostate, per oltre il 50%, argilloso-marnosi pliocenici sui quali si sviluppano suoli ricchi in carbonati, con moderato accumulo di sostanza organica in superficie e, talora, proprietà vertiche.

Queste ultime considerazioni sono state confermate dal modello di analisi spaziale realizzato ad hoc che ha permesso di incrociare le SeS con le caratteristiche territoriali dell'area di studio (carta geologica, carta dell'acclività, carta dell'esposizione dei versanti, carta dei suoli e carta dell'uso del suolo).

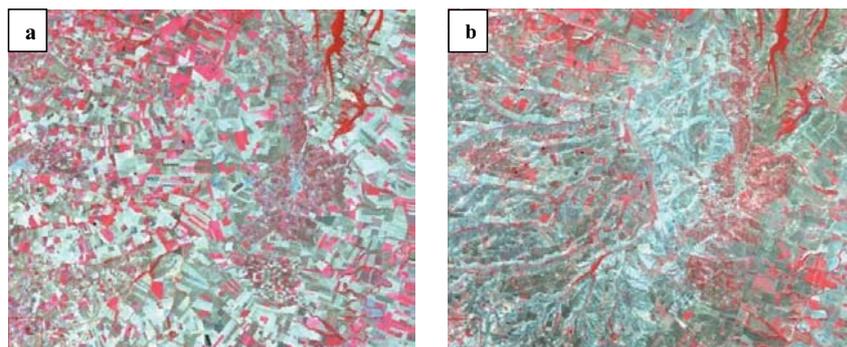


Fig. 7 - Superfici soggette ad erosione areale visibili nelle immagini Landsat 432: a) giugno; b) agosto. Gli elementi lineari di colore chiaro visibili in "b" corrispondono ai versanti denudati dai processi erosivi.

In conclusione, con questo studio, sono stati messi a confronto i dati territoriali di natura geologica, morfotopografica e pedologica già noti in letteratura con dati originali desunti dall'analisi e dall'elaborazione, anche in ambiente GIS, del dataset 1992-2004, al fine di individuare, rappresentare e quantificare le superfici soggette a fenomeni di erosione o superfici di neoformazione per fenomeni erosivi. La fig. 6 mostra i risultati ottenuti e la distribuzione delle

superfici soggette a fenomeni di erosione individuate nell'area di studio, ubicata al confine molisano-pugliese. Come si osserva tali superfici hanno subito delle modificazioni in forma e posizione e questo si evince dalla carta che mostra l'insieme delle SeS per ogni anno (fig. 8).

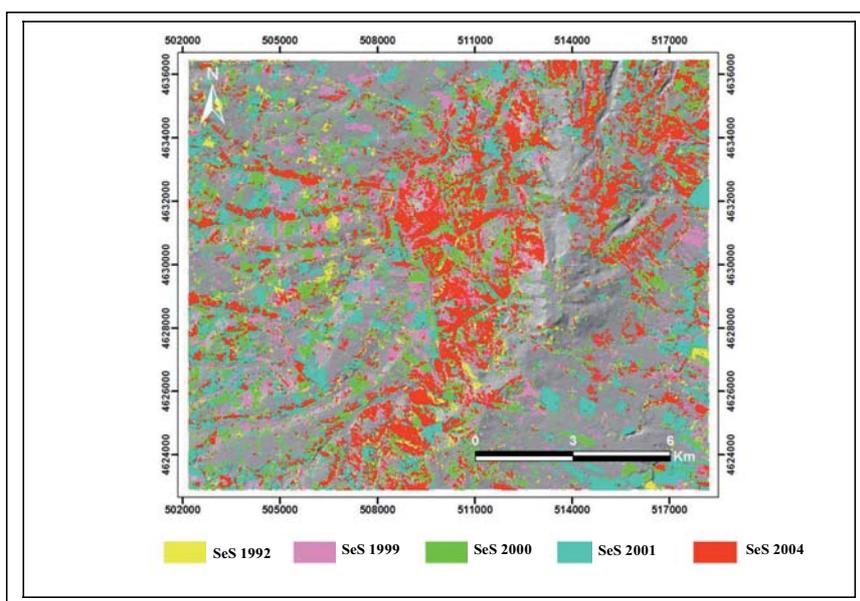


Fig. 8 – Carta della distribuzione delle SeS degli anni 1992, 1999, 2000, 2001, 2004.

Le modificazioni nella distribuzione spaziale delle SeS per gli anni considerati ci fa pensare che non sempre una superficie classificata come soggetta a fenomeni di erosione per un dato anno risulti tale anche gli anni successivi. A tal proposito è stata elaborata un'altra carta, risultante dall'operazione di *intersect analysis* nel GIS, che ha permesso di individuare le superfici soggette a fenomeni di erosione idrica per ogni anno di acquisizione, cioè quelle superfici che sono sempre soggette a fenomeni di erosione nel nostro dataset temporale (fig. 9). Nella stessa carta si evidenziano anche le superfici che non sono risultate essere soggette ad erosione idrica del suolo e le superfici, che a causa della loro variabilità di comportamento sono risultate essere solo occasionalmente soggette a fenomeni di erosione.

I dati e le deduzioni sono stati opportunamente confrontati e validati da riscontri effettuati sul campo e dall'analisi diretta *in situ* delle caratteristiche delle superfici di erosione.

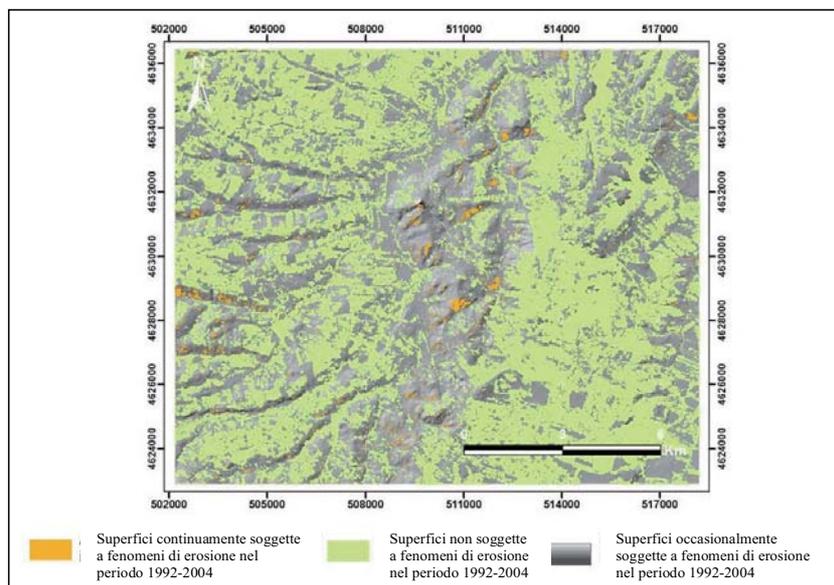


Fig. 9 –Superfici costantemente soggette a fenomeni di erosione (in arancio), superfici non soggette a fenomeni di erosione (in verde) e superfici occasionalmente soggette a fenomeni di erosione (in toni di grigio) nel periodo 1992-2004.

Bibliografia

- Beguieria S. (2006) - *Identifying erosion areas at basin scale using remote sensing data and GIS: a case study in a geologically complex mountain basin in the Spanish Pyrenees*. International Journal of Remote Sensing, 27(20): 4585-4598.
- Boni A., Casnedi R., Centamore E., Colantoni P., Cremonini G., Elmi C., Monesi A., Selli R., Valletta M. (1969) - Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000, Foglio 155 - San Severo. Servizio Geologico d'Italia, Roma, 45 pp.
- De Jong S.M., Paracchini M.L., Bertolo F., Folving S., Megier J. De Roo A.P.J. (1999) - Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data. *Catena*, 37(3-4): 291-308.
- Escadafal R. (1994) - Soil spectral properties and their relationships with environmental parameters: examples from arid regions. In: Hill J. Mègier J. (Eds.), *Imaging spectrometry – a tool for environmental observations*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, The Netherlands: 71-87.
- Eswaran H., Lal R., Reich P.F. (2001) - Land degradation: an overview. In: Bridges E.M., Hannam I.D., Oldeman L.R., Penning de Vries F.W.T., Scherr S.J., Sombapanit S. (Eds.), *Response to Land Degradation*. Sc. Pub. Inc., Enfield, NH, USA: 20-35.
- King C., Delpont G. (1993) - Spatial assessment of erosion: contribution of remote sensing, a review. *Remote Sensing Reviews*, 7: 223-232.
- Lal R. (1998) - Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 17(4): 319-464.
- Lo Curzio S. (2006) - Applicazione di tecniche di remote sensing all'analisi geomorfologica ed alle modificazioni ambientali di un'area al confine tra Puglia, Molise e Campania. Tesi di Dottorato di Ricerca (XVIII ciclo) inedita, Università degli Studi del Sannio, Benevento, pp. 259.
- Lo Curzio S. (2009) - Identificazione di superfici soggette a erosione del suolo mediante analisi ed elaborazione di dati Landsat. *Rivista italiana di Telerilevamento* – 2009, 41 (1): 25-36.

- Millington A.C., Townshend J.R.G. (1984) - Remote sensing applications in African erosion and sedimentation studies. In: Walling D.E., Foster S.S.D., Wurzel P. (Eds.): *Challenges in African Hydrology and Water Resources*: Proc. of the Harare Symposium. IAHS Publ., IAHS Press, 144: 373-384.
- Pimentel D., Harvey C., Resosudarmo P., Sinclair K., Kurz D., McNair M., Crist S., Shpritz L., Fitton L., Saffouri R., Blair R. (1995) - Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267: 1117-1123.
- Servizio Cartografico Regione Puglia (2002) - Carta Pedologica. www.regione.puglia.it
- Servizio Geologico d'Italia (1969) - Carta geologica d'Italia 1:100.000, Foglio 155 (S. Severo). Servizio Geologico d'Italia, Roma.
- Siaeku J., Oguchi T. (2000) - Soil erosion analysis and modelling: a review. *Transactions of Japanese Geomorphological Union*, 21(4): 413-429.
- USDA (1998) - Keys to Soil Taxonomy. 8th Edition. NRSC: pp. 325.
- Van Rompaey A.J.J., Govers G. (2002) - Data quality and model complexity for regional scale soil erosion prediction. *Geomorphology*, 16(7): 61-68.
- Vrieling A. (2006) - Satellite remote sensing for water erosion assessment: a review. *Catena*, 65: 2-18.