

CONFRONTO DI APPROCCI CORRELATIVI PER IL MONITORAGGIO SATELLITARE DEL RECUPERO POST-INCENDIO DELLA VEGETAZIONE FORESTALE

Gherardo CHIRICI(*), Marco MARCHETTI(*), Walter MATTIOLI(**), Marco OTTAVIANO(*),
Andrea LAMONACA(**), Piermaria CORONA(**)

(*) Lab. EcoGeoFor, Dipartimento di Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e il Territorio, Università degli Studi del Molise, Contrada Fonte Lappone, Pesche (IS), Italy, tel. +39086526103, mail:

gherardo.chirici@unimol.it, marchettimarco@unimol.it, ottaviano@unimol.it

(**) Lab. sisFOR, Dipartimento dell'Ambiente Forestale e delle sue Risorse, Università degli Studi della Tuscia, Via S. Camillo de Lellis snc, 01100 Viterbo (VT), Italy, tel. +390761357405, fax +390761357389, mail:

walter.mattioli@unitus.it, alamo.sisfor@unitus.it, piermaria.corona@unitus.it

Riassunto

Il presente lavoro è focalizzato sulla possibilità di analisi multitemporale del recupero post-incendio della vegetazione forestale nel Parco Nazionale del Cilento e Vallo di Diano, integrando dati telerilevati da satellite Landsat (in totale quattro immagini acquisite tra il 1993 e il 2004, tre da Landsat 5 e una da Landsat 7) con i rilievi a terra. In particolare è stata analizzata la dinamica di ricostituzione a seguito del passaggio del fuoco con riferimento a una *cronosequenza* (analisi sincronica) di incendi boschivi nella serie di vegetazione *Teucrio siculi-Quercion cerridis*. In una rete di aree campione permanenti georeferenziate sono state condotte a terra misure sulla rinnovazione naturale gamica e agamica. Allo scopo di produrre una rappresentazione spazializzata delle dinamiche di ricostituzione naturale, i valori di riflettanza spettrale delle immagini Landsat e di vari indici di vegetazione ottenuti dalla loro combinazione sono stati correlati con parametri rilevati a terra indicatori della velocità rigenerativa della biocenosi percorsa da fuoco (incremento medio annuo dell'indice di rinnovazione naturale gamica, incremento medio annuo dell'indice di rinnovazione naturale agamica). La spazializzazione per correlazione è stata operata confrontando tre approcci: correlazione pixel per pixel; correlazione per gruppi di pixel; correlazione per poligoni ottenuti da segmentazione. Le migliori potenzialità predittive sono state ottenute utilizzando l'approccio per segmentazione e immagini non normalizzate topograficamente. Le bande satellitari più efficaci risultano la 3 (*red*) e la 4 (*NIR*) mentre gli indici di vegetazione più efficaci risultano NBR, NII, RI_NBR e NDVI.

Abstract

This work is focused on the use of remote sensing techniques for multitemporal monitoring of forest vegetation recovery after the large wildfire occurred in the Cilento National Park (Southern Italy) through the integration of high resolution satellite information (in total four Landsat images, three acquired from Landsat 5 and one from Landsat 7 from 1993 to 2004 were used) with field data. In particular the recovery dynamics after the fire passage has been analyzed with reference to a *chronosequence* (synchronic analysis) of forest fires in the *Teucrio siculi-Quercion cerridis* vegetation series. A net of several geocoded sample plots were randomly selected on the field to measure and evaluate gametic and agamic regeneration. With the aim to produce a spatialized representation of natural vegetation recovery, the reflectance values and the values of the vegetation indexes obtained have been correlated with field data parameters that indicate the regenerative speed of the vegetation after fire. The spatialization has been done comparing three different approaches: pixel by pixel correlation; correlation by groups of pixel; correlation by polygons

obtained by segmentation. The best predictive results were obtained using the approach based on segmentation and using data extracted by not-topographically normalized images. The more useful satellite bands are the 3 (red) and 4 (NIR) channels while the more effective vegetation indexes are NBR, NII, RI_NBR and NDVI.

Introduzione e area di studio

L'impatto degli incendi boschivi sulla biodiversità vegetale e le conseguenze ecologiche che ne derivano costituiscono un campo di ricerca non ancora pienamente esplorato (Marzano *et al.*, 2004). I danni che il fuoco provoca sulla vegetazione forestale dipendono da numerosi fattori: dal sistema selvicolturale con cui un bosco viene gestito; dalla stagionalità, dalla frequenza, dall'estensione dell'area incendiata e così via. Nelle Regioni meridionali gli incendi rappresentano un problema più marcato rispetto alla generale situazione italiana: frequenti sono gli incendi dolosi, soprattutto correlati a fenomeni di disagio socio-economico (Leone e Lovreglio, 2004); inoltre, in queste Regioni, alcuni fattori naturali quali condizioni climatiche e caratteristiche vegetazionali, favoriscono il propagarsi del fuoco. Nelle aree protette all'interno di queste Regioni il rischio di incendi boschivi gioca un ruolo essenziale, in quanto questi territori posseggono valori naturalistici ed emergenze paesaggistiche con caratteristiche sia di particolare pregio che di vulnerabilità. In

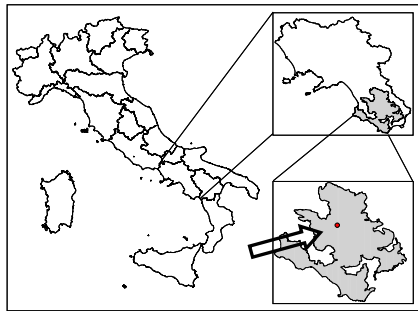


Figura 1 – Area di studio

questo contesto, è stata condotta una specifica analisi sulle potenzialità del monitoraggio satellitare post-incendio. A tal fine è stata scelta un'area campione nel Parco Nazionale del Cilento e Vallo di Diano (figura 1) fortemente soggetta al rischio di incendi boschivi estivi, con presenza di incendi di alta intensità ($> 6.000 \text{ kWm}^{-1}$), e caratterizzata da elevata variabilità ambientale, all'interno di un contesto socio-economico relativamente omogeneo. Nell'area sono stati selezionati tre incendi verificatisi rispettivamente il 10 agosto 1993, il 3 Luglio 1997 e il 4 Luglio 2000. Essendo

avvenuti in condizioni territoriali, pirologiche e ambientali analoghe, questi incendi, che hanno interessato una superficie totale percorsa di circa 120 ha il primo, 540 ha il secondo e 390 ha il terzo, possono essere assunti come una *cronosequenza* (approccio di analisi di tipo sincronico), nel senso che le aree da essi interessate, caratterizzate da un differente numero di anni trascorso dalla percorrenza del fuoco rispetto alla data di acquisizione dei dati a terra (estate 2005), possono essere considerate rappresentative della dinamica di ricostituzione naturale post-incendio per tali condizioni ambientali e vegetazionali (serie di vegetazione riconducibile al *Teucrio siculi-Quercion cerridis*).

Metodologia

Scopo del seguente lavoro è stato quello di effettuare una *analisi del recupero post-incendio* della vegetazione forestale, utilizzando sia dati telerilevati da satellite (soprattutto per la capacità di fornire una restituzione multitemporale affidabile dell'attività fotosintetica, e di conseguenza delle connesse potenzialità di ricostituzione degli ecosistemi percorsi dal fuoco), che rilievi a terra. Questi ultimi sono stati realizzati predisponendo una rete di *aree campione permanenti georeferenziate*, al fine di valutare in dettaglio la dinamica di ricostituzione naturale della vegetazione bruciata, caratterizzandola anche dal punto di vista fitosociologico. In ciascuna area campione sono state condotte misure sia sulla rinnovazione gamica che su quella agamica, che sono state poi confrontate con la dinamica degli indici di vegetazione ottenuta dai dati telerilevati al fine di spazializzare le informazioni sull'intera area di studio.

Dati satellitari

Le fasi di studio hanno previsto il processamento di una serie multitemporale di quattro immagini Landsat dell'area inizialmente sottoposte a correzione atmosferica e topografica basata sul metodo

dark-object rivisitato (Chavez, 1996), che stima la trasmissività atmosferica in funzione del coseno e dello zenit solare (Ottaviano *et al.*, 2005). Le immagini utilizzate per le elaborazioni, selezionate in maniera tale da essere caratterizzate da bassa copertura nuvolosa, sono:

- Landsat 5 TM Path 189 - Row 32, acquisita il 23 agosto 1993;
- Landsat 5 TM Path 189 - Row 32, acquisita il 5 ottobre 1997;
- Landsat 7 ETM+ Path 189 - Row 32, acquisita il 2 agosto 2000;
- Landsat 5 TM Path 189 - Row 32, acquisita il 20 luglio 2004.

Sulle immagini satellitari pre-elaborate si è proceduto al calcolo dei quattro indici di vegetazione (NDVI, NBR, NII, MVI):

$$NDVI = \frac{(\rho_4 - \rho_3)}{(\rho_4 + \rho_3)} \quad [1] \quad NBR = \frac{(\rho_7 - \rho_4)}{(\rho_7 + \rho_4)} \quad [2] \quad NII = \frac{(\rho_4 - \rho_5)}{(\rho_4 + \rho_5)} \quad [3] \quad MVI = \frac{(\rho_5)}{(\rho_4)} \quad [4]$$

Con riferimento a ognuno dei quattro indici di vegetazione, sono stati inoltre elaborati due indici multitemporali di rigenerazione (RI: *Regeneration Index*, NRI: *Normalized Regeneration Index*):

$$RI = \frac{VI_t}{VI_{t+1}} \quad [5] \quad NRI = 1 + \frac{VI_t - VI_{t+1}}{VI_t + VI_{t+1}} \quad [6]$$

dove VI_t rappresenta il valore di un dato indice di vegetazione nelle aree bruciate al tempo t_0 , mentre VI_{t+1} rappresenta il valore dell'indice di vegetazione della stessa area nell'immagine al tempo t_1 (successivo).

Rilievi a terra

In ciascuna delle tre superfici percorse dal fuoco considerate sono state realizzate parcelle permanenti georeferenziate di monitoraggio a terra, di superficie unitaria pari a 20 m², per un totale di 64 parcelle. In ciascuna parcella sono stati rilevati i seguenti dati: livello di danno residuo per ciascun individuo arboreo vivo; modello di combustibile; elenco delle specie e dell'abbondanza di piante vascolari; altezza e percentuale di copertura dello strato erbaceo eventualmente presente; altezza e percentuale di copertura della lettiera eventualmente presente; rilievo dei riscoppi vegetativi di ciascuna ceppaia arborea; rilievo della rinnovazione arborea gamica (numero e altezza media dei semenzali, suddivisi per specie).

Sulla base dei dati acquisiti a terra sono stati calcolati i seguenti indici di rigenerazione:

- $IRagam = \sum Volume\ apparente\ biospazio\ epigeo\ polloni$ [m³/20 m²]
- $IRgam1 = \sum Altezza\ rinnovazione\ da\ seme\ (h < 1.30m)$ [m/m²]
- $IRgam2 = \sum Area\ basimetrica\ rinnovazione\ da\ seme\ (h > 1.30\ m)$ [m²/20 m²]

I valori dei suddetti indici di rigenerazione rilevati a terra sono stati correlati con i valori spettrali e degli indici rilevati da satellite, al fine di valutarne le potenzialità per una spazializzazione multitemporale a livello dell'intera superficie dei singoli incendi esaminati.

Analisi preliminari

Sulla base delle analisi correlative applicate tra gli indici di rigenerazione rilevati a terra ($IRagam$, $IRgam1$, $IRgam2$) e i valori spettrali, analisi effettuate comparando immagini non corrette topograficamente vs. immagini corrette topograficamente e comparando correlazione *pixel per pixel* vs. correlazione per *gruppi di pixel* vs. correlazione per *segmenti*, possono essere inferite le seguenti osservazioni generali: le migliori potenzialità predittive si hanno con l'approccio per segmentazione, e, secondariamente, nell'approccio per gruppi 3x3 di *pixel*; l'indice $IRagam$ si correla in maniera statisticamente più significativa alla riflettanza spettrale rispetto agli indici $IRgam1$ e $IRgam2$; la correzione topografica tende a produrre distorsioni tali da ridurre la significatività delle relazioni tra attributi di rigenerazione rilevati a terra e attributi spettrali

telerilevati; gli attributi spettrali ottenuti dalla segmentazione con la maggiore efficacia predittiva sono l'omogeneità, il secondo momento angolare e la correlazione all'interno di ciascun segmento, soprattutto con riferimento alle bande 4 e 7 e agli indici NDVI e NII. Quest'ultimo risultato conferma quanto già affermato relativamente alla capacità discriminante di alcune bande del satellite Landsat rispetto alla vegetazione. In particolare, la banda 4 (NIR) è quella che viene maggiormente riflessa dai pigmenti della clorofilla e pertanto è utilizzata in tutte le combinazioni spettrali dei vari indici di vegetazione (come gli stessi NDVI e NII), mentre la banda 7 (MIR) oltre alla parziale interazione con i pigmenti della clorofilla possiede un'elevata capacità di discriminare il tenore idrico delle superfici, tanto è vero che la combinazione di queste due bande, (es. indice NBR) è solitamente utilizzata per classificazioni del livello di danno su superfici percorse da incendio. Essendo le immagini utilizzate per questo studio tutte acquisite nel periodo estivo, una più alta concentrazione di clorofilla e un più elevato contenuto di umidità di alcune superfici osservate (come quelle arboree) generano una forte differenziazione rispetto a quelle circostanti che invece vengono sottoposte a maggiore insolazione e dunque soggette a maggiore evaporazione, spiegando perché queste due bande siano ben correlate all'intensità di rigenerazione naturale.

Modello spazializzato della velocità di ricostituzione naturale

I dati di rinnovazione naturale, sia gamica che agamica, rilevati nell'estate 2005 sui singoli incendi della *cronosequenza* esaminata, sono stati correlati agli attributi spettrali ottenuti tramite l'approccio per segmentazione. In un simile approccio multitemporale la variabile dipendente è rappresentata dall'incremento medio annuo degli indici di rigenerazione (essendo questi ultimi rilevati nello stesso momento su aree percorse da incendio in anni differenti), mentre le variabili indipendenti sono i valori di riflettanza spettrale delle singole bande e dei vari indici di vegetazione ottenuti per ciascun *pixel* dell'immagine Landsat del 2004. L'incremento medio annuo degli indici di rigenerazione esprime numericamente ciò che può essere definita come la velocità di ricostituzione naturale dei popolamenti forestali percorsi dal fuoco, quale indicatore della dinamica di recupero post-incendio in termini di concreta esplicazione delle potenzialità rigenerative della biocenosi. Le analisi sono state condotte mediante regressione lineare multipla con procedura a passi (*stepwise regression*, con probabilità di F per inserimento pari a 0,05 e probabilità di F per esclusione pari a 0,1) applicata sia alle immagini non corrette topograficamente che a quelle corrette, adottando quale variabile dipendente l'incremento medio di ciascuno degli indici di rigenerazione considerati (incremento medio di *IRagam*, incremento medio di *IRgam1*, incremento medio di *IRgam2*).

Spazializzazione per segmenti su immagini non corrette topograficamente

Incremento medio dell'indice di rigenerazione agamica [IRagam/anni dall'incendio]

	Coefficienti	Errore std.	T	p
Costante	-2.428,949	241,741	-10,048	0,000
Mean Banda_4	-1.672,000	460,597	-3,630	0,001
Deviazione standard banda_3	6,038	1,157	5,217	0,000
Entropia banda_1	46,495	4,910	9,469	0,000
Deviazione standard NRI_NBR	8,813	1,240	7,108	0,000
Media RI_NBR	10,098	1,348	7,490	0,000
Contrasto banda_3	0,007	0,003	2,582	0,016
Entropia RI_NII	30,062	4,955	6,067	0,000
Deviazione standard Banda_1	3,606	0,930	3,878	0,001
Secondo momento angolare NDVI	1.689,488	633,173	2,668	0,013

$$r^2 = 0,890$$

$$\text{errore standard di stima (\%)} = 26$$

*Incremento medio dell'indice di rigenerazione gamica 1 [(IRgam1*1000)/anni dall'incendio]*

	Coefficienti	Errore std.	T	P
Costante	-0,321	0,215	-1,490	0,146
Secondo momento angolare NBR	291,306	29,105	10,009	0,000
Secondo momento angolare RI_NBR	-308,556	34,962	-8,825	0,000
Dissimilarità NDVI	0,013	0,006	2,104	0,043

$r^2 = 0,776$

errore standard di stima (%) = 139

Incremento medio dell'indice di rigenerazione gamica 2 [IRgam2/anni dall'incendio]

	Coefficienti	Errore std.	T	P
Costante	-1,082	2,116	-0,511	0,000
Media banda_7	0,059	0,011	5,521	0,000
Deviazione standard banda_5	0,148	0,016	9,094	0,000
Secondo momento angolare banda_4	-77,447	8,763	-8,838	0,000
Correlazione Banda_1	-0,779	0,158	-4,939	0,000
Correlazione NRI_NII	-0,910	0,244	-3,728	0,000
Deviazione standard RI_NII	-0,088	0,020	-4,450	0,000
Deviazione standard NRI_MVI	-0,091	0,022	-4,092	0,000
Secondo momento angolare banda_5	30,168	5,885	5,126	0,000
Deviazione standard banda_7	-0,072	0,015	-4,839	0,000
Omogeneità RI_NII	-6,963	2,720	-2,560	0,000

$r^2 = 0,888$

errore standard di stima (%) = 35

Spazializzazione per segmenti su immagini corrette topograficamente

Incremento medio dell'indice di rigenerazione agamica [IRagam/anni dall'incendio]

	Coefficienti	Errore std.	t	p
Costante	120,924	62,453	1,936	0,062
Entropia generale	34,883	6,138	5,683	0,000
Deviazione standard NII	-18,090	2,217	-8,160	0,000
Deviazione standard MVI	13,479	2,262	5,960	0,000
Secondo momento angolare RI_NII	2.265,592	579,866	3,907	0,000
Dissimilarità banda 3	-17,437	4,691	-3,717	0,001

$r^2 = 0,771$

errore standard di stima (%) = 37

*Incremento medio dell'indice di rigenerazione gamica 1 [(IRgam1*1000)/anni dall'incendio]*

	Coefficienti	Errore std.	T	P
Costante	-0,543	0,195	-2,785	0,009
Omogeneità banda_1	13,240	3,191	4,149	0,000

$r^2 = 0,336$

errore standard di stima (%) = 240

Incremento medio dell'indice di rigenerazione gamica 2 [IRgam2/anni dall'incendio]

	Coefficienti	Errore std.	t	P
Costante	23,391	5,211	4,489	0,000
Contrasto Banda_4	-12,907	2,720	-4,745	0,000
Deviazione standard RI_NBR	-0,013	0,003	-3,852	0,001
Mean RI_NBR	-0,146	0,035	-4,217	0,000
Deviazione standard NDVI	-0,127	0,035	-3,638	0,001
Deviazione standard NRI_MVI	0,044	0,019	2,352	0,025

$r^2 = 0,606$

errore standard di stima (%) = 63

Discussione

I migliori risultati per la spazializzazione della velocità di ricostituzione naturale sono ottenuti utilizzando i dati estratti dalle immagini non normalizzate rispetto a quelli delle immagini normalizzate. Ciò potrebbe essere giustificato dalla non perfetta qualità dei dati di base utilizzati per la correzione delle immagini. Un interessante risultato si riferisce alla buona stima dell'incremento medio di IRgam e IRgam2, al contrario di ciò che avviene per l'IRgam1 che dimostra ulteriormente come il contributo offerto dalla copertura fogliare resti fondamentale in studi di questo tipo, a maggior ragione quando correlata con dati telerilevati, proprio per le peculiarità spettrali intrinseche della vegetazione. L'IRgam1 infatti si riferisce alla rinnovazione gamica al di sotto di 1,30 m, il che presuppone piante di dimensioni ridotte e con chiome molto piccole, che probabilmente non contribuiscono al risultato di correlazione tra il dato rilevato a terra e quello remoto da satellite. Le bande più efficaci in termini predittivi sono la banda 3 (*red*) e la banda 4 (*NIR*) di fatto, la vegetazione "verde" produce una curva di riflettanza tipica, il cui andamento, è caratterizzato dall'assorbimento nella regione del rosso visibile (banda 3) e da una forte riflettività nel vicino infrarosso (banda 4) che nettamente differenzia la vegetazione fotosinteticamente attiva da tutti gli altri tipi di coperture naturali. Gli indici di vegetazione più efficaci sono NBR, NII, RI_NBR e NDVI. Questi indici utilizzano almeno una delle due bande risultate efficaci, e addirittura l'NDVI le utilizza tutte e due in un rapporto normalizzato. Anche in questo caso si conferma la bontà dell'utilizzo dell'indice NDVI e dell'indice NBR sia per la mappatura delle aree incendiate sia per la valutazione del recupero post-incendio della vegetazione. Per quanto riguarda il buon risultato ottenuto con l'indice NII, esso ne conferma le potenzialità nel discriminare le diverse fasi nell'evoluzione degli arbusteti mediterranei caratterizzandoli in base alla diversa quantità di biomassa telerilevata e offrendo l'opportunità di seguire su base qualitativa i principali cambiamenti che caratterizzano la dinamica della ricolonizzazione.

Conclusioni

Il processo di integrazione di dati telerilevati con dati rilevati a terra costituisce una valida fonte informativa di fronte alla necessità di definire progettualmente gli interventi di recupero a partire dalla conoscenza funzionale e strutturale del mosaico territoriale e dalla estensione e comportamento dei fenomeni di incendio. In questo modo è possibile individuare con tempestività ed efficienza le aree prioritarie di intervento e le modalità più efficaci per tutelare e favorire la biodiversità, nel rispetto della multifunzionalità della copertura forestale. Nel caso in esame, la spazializzazione degli indici di rigenerazione ha evidenziato come le migliori potenzialità predittive sulla dinamica strutturale forestale post-incendio si abbiano con l'approccio per segmentazione. Si è ottenuta una buona stima dell'incremento medio annuo degli indici di rigenerazione, che in questo tipo di approccio può concettualmente essere definito come indicatore della velocità rigenerativa della biocenosi percorsa da fuoco. I risultati più soddisfacenti sono stati ottenuti utilizzando dati estratti da immagini non normalizzate topograficamente. Le bande più efficaci risultano la 3 (*red*) e la 4 (*NIR*) mentre gli indici di vegetazione più efficaci risultano NBR, NII, RI_NBR e NDVI.

Bibliografia

- Chavez P.S. (1996) – "Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62: 1025-1036
- Leone V., Lovreglio R. (2004) – "Analisi delle cause e delle motivazioni". In: Blasi *et al.* (a cura di): *"Incendi e complessità ecosistemica"*. Direzione per la Protezione della Natura (DPN), Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, Roma: 79-83
- Marzano R., Bovio G., Minotta G. (2004) – "Metodologia di analisi a differenti scale. Incendi boschivi e diversità biologica". *Linea Ecologica*, 36 (6): 41-47
- Ottaviano M., Di Martino P., Marchetti M., Corona P. (2005) – "Indici di vegetazione e dinamica di ricostituzione dei boschi percorsi dal fuoco in ambiente mediterraneo". *Atti IX Conferenza ASITA*. Catania. Vol. 2: 1577-1582