La dinamica della vegetazione nel Sud Italia dal 1995 al 2006 studiata dalle variazioni dell'indice NDVI e delle precipitazioni

Flavio PARMIGIANI (*), Gianvito QUARTA (**), Gian Paolo MARRA (**), Dario CONTE (**)

{f.parmiggiani, g.quarta, gp.marra, d.conte}@ isac.cnr.it
(*) ISAC-CNR, Via P. Gobetti 101, I-40129 Bologna – Italy, tel. +39 051 6399618
(**) ISAC-CNR, S.P Lecce-Monteroni, I-73100 Lecce – Italy, tel. +39 0832 298811

Riassunto
I trend della vegetazione per due macro-regioni del Sud Italia e del Nord Africa sono state analizzati impiegando il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) alla ricerca di evidenze di cambiamenti climatici ed associati processi di desertificazione. La parte del Sud Italia analizzata comprende la Puglia, la Campania, la Basilicata, la Calabria e la Sicilia mentre quella di Nord Africa copre la parte Nord della Libia. Gli indici di vegetazione sono stati ricavati dagli archivi del DLR in forma di mappe NDVI composite mensili. Le analisi delle variazioni temporali della vegetazione sono state eseguite impiegando specifiche procedure che permettono una misura obiettiva della variazione di vegetazione e delle associate anomalie. Inoltre, i dati di precipitazione per lo stesso periodo e per le medesime regioni geografiche sono stati analizzati con l'obiettivo di individuare la correlazione tra i due fenomeni. Infine sono presentati i risultati delle analisi per le due macro regioni per il periodo 1995-2006.

Abstract
Vegetation trend in the last eleven years were analyzed for two macro-regions, South Italy and North Africa, in search for evidence of climate changes and associated desertification processes. The South Italy macro-region comprises Apulia, Campania, Basilicata, Calabria and Sicily regions, while the North Africa one covers the northern part of Lybia. Vegetation index data for the whole Europe and North Africa can be retrieved from the DLR archive of thematic maps in the form of monthly composite Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) maps. The analysis of temporal vegetation variations was performed by implementing specific routines which provide objective measurements of vegetation trends and anomaly. Rainfall data for the same periods and geographic areas, were also analyzed in order to investigate the correlation between the two phenomena. Results for the two selected macro-regions, from 1995 to 2006, are presented and discussed.

Introduzione

Il clima mediterraneo, tipicamente caldo, asciutto e ventilato, è caratterizzato da ricorrenti periodi siccitosi che si alternano ad altri, numerosi, periodi piovosi. Tuttavia, specie se analizzato a medio e lungo termine, tale clima mostra una ricorrenza sempre maggiore dei periodi di siccità. Infatti, la quantità media annuale di pioggia ha subito una diminuzione in tutto il bacino mediterraneo, con variazioni più marcate in Spagna, nel Nord Italia e in Puglia con evidente impatto sulla vegetazione presente in tali aree. Scopo di questo lavoro è lo studio del 'trend' della quantità totale di vegetazione e delle precipitazioni negli ultimi 12 anni nel Sud Italia.
La metodologia adottata è basata sull'analisi delle serie temporali dell'indice di vegetazione NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) derivato dal sensore AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo dei satelliti NOAA e delle serie temporali delle precipitazioni misurate attraverso reti di stazioni a terra. L'indice di vegetazione NDVI per il sensore AVHRR è

calcolato dalle misure nel canale 1 (visibile) e nel canale 2 (vicino infrarosso) attraverso la relazione:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_v}{\rho_{nir} + \rho_v} \qquad [1]$$

dove ρ_v e ρ_{nir} rappresentano le riflettanze della superficie nelle regioni dello spettro elettromagnetico che vanno dai 550 ai 680nm e dai 725 ai 1100nm rispettivamente. Le serie temporali di tale indice sono disponibili a scala globale e continentale negli archivi di diverse agenzie spaziali ed offrono la possibilità di effettuare un monitoraggio quantitativo della vegetazione. La validità di tale indice per il monitoraggio della vegetazione è stata dimostrata negli ultimi 20 anni da una quantità enorme di articoli apparsi nella letteratura. Per quanto riguarda la metodologia utilizzata nel presente lavoro, essa si basa sull'analisi della media spaziale dell'indice mensile NDVI e della sue anomalie, queste ultime definite come scostamento dei valori mensili dell'indice rispetto al valore 'medio' mensile a lungo termine. Lo stesso criterio è stato adottato per i dati riguardanti le precipitazioni con la sola differenza che non è stata valutata l'anomalia essendo le precipitazioni un fenomeno che non mostra una stazionarietà marcata come è invece il caso della vegetazione.
I risultati ottenuti mostrano che, di fatto, sia la vegetazione che le precipitazioni sono processi approssimativamente stazionari a lungo termine, con una evidente, tuttavia leggera, tendenza alla diminuzione di entrambi. I risultati ottenuti saranno anche confrontati con quelli ottenuti per una regione del Nord Africa, affacciata sul bacino mediterraneo, compresa entro gli stessi confini longitudinali.
Nel seguito dell'articolo saranno descritti dapprima i dati utilizzati, quindi la metodologia di analisi ed infine saranno presentati e discussi i risulti ottenuti.

Dataset
Le serie temporali di immagini NDVI utilizzate in questo studio sono state ottenute dall'archivio del EOWEB del DLR (Earth Observation on the Web, German Aerospace Center) che fornisce l'accesso a differenti prodotti di osservazione della Terra tra cui quelli derivati dal sensore AVHRR. In particolare le mappe NDVI sono disponibili su EOWEB come mosaico per l'intera Europa e per il Nord Africa sotto forma di prodotto composito giornaliero, settimanale e mensile. Da tale archivio sono stati estratti i prodotti compositi mensili di livello 3 (Montly Maximum Value Composite, MMVC); il prodotto MMVC assicura una buona qualità e garantisce l'assenza di alterazioni atmosferiche dovute a nubi ed aerosol. Sono stati acquisiti i prodotti mensili per il periodo che va dal 1995 sino al 2006, con alcune 'assenze' negli anni 1999, 2000 e 2001 dovute a guasti al sensore AVHRR. Le mappe sono state acquisite nel formato HDF-4 consistente in un livello ad 8 bit di risoluzione (256 livelli di grigio) e quindi convertite in valori di NDVI e geo-referenziate. Da queste sono poi state estratte le due aree di interesse. Nelle immagini i pixel corrispondenti a mare, nubi o dati non validi sono già 'marcati' e ciò permette di escluderli facilmente nelle operazioni di analisi.
I dati di precipitazione sono stati acquisiti dagli archivi del Global Precipitation Climatology Centre (GPCC, Germania) che fornisce dati ed analisi globali sulle precipitazioni per il monitoraggio e la ricerca sul clima della Terra. I dati di precipitazione sono disponibili in tale archivio dal 1951 al 2004 e sono ricavati attraverso una rete diffusa di stazioni a terra a copertura irregolare e per mezzo di un processo di controllo della qualità. I dati sono disponibili in forma grigliata con risoluzioni di 2.5°. 1.0° e 0.5°. Per la presente analisi si sono usati i dati con risoluzione di 0.5° relativi alla regione del Sud Italia più quelli relativi alla regione del Nord Africa, per il periodo dal 1993 al 2004.
Per entrambi i dataset (indice NDVI e dati di precipitazione) le due finestre analizzate per il Sud Italia ed il Nord Africa si estendono da 12°E a 18.5°E in longitudine e rispettivamente da 42°N a 36°N e da 33.4°E a 29.8°E in latitudine.

Metodologia di analisi

L'analisi effettuata nel presente lavoro è basata su due semplici metodi che permettono di ottenere il 'trend' della vegetazione media nel periodo 1995-2006 e di analizzare le anomalie della stessa negli anni considerati.

Il primo metodo di analisi permette di analizzare il 'trend 'della vegetazione attraverso l'NDVI totale e la sua media spaziale per ogni mese ed anno. Infatti, partendo dai valori dell'indice NDVI mensile $x(k,m,y)$ per ogni pixel *k*, mese *m* ed anno *y*, la media spaziale può essere calcolata come

$$\bar{x}_k(m,y) = \frac{1}{N_p}\sum_{k=1}^{N_p} x(k,m,y) \qquad [2]$$

dove N_p rappresenta il numero totale di pixel per l'area analizzata, esclusi però, come già accennato, i pixel corrispondenti a mare, nubi o ghiaccio/neve. Attraverso tale procedura si è ricavata la serie temporale della vegetazione media per il periodo e per entrambe le regioni considerate.

Il secondo approccio si ispira ad una metodologia proposta da Myneni et al. (1998) migliorata attraverso l'utilizzo del valore mediano dell'NDVI mensile al posto del valore medio, al fine di ottenere un descrittore del comportamento medio che sia robusto rispetto alle variazioni sporadiche di forte intensità. Questo metodo permette di ottenere una stima dell'anomalia della vegetazione per ogni mese ed anno, rispetto al valore medio mensile a lungo termine, calcolato sui dodici anni considerati. In dettaglio, come valore medio mensile si è considerato il valore mediano: infatti, il valore mensile dell'indice NDVI per un dato pixel può essere considerato una variabile aleatoria appartenente ad una data distribuzione. Il valore mediano di tale variabile aleatoria è il valore *p* che ha probabilità pari a 0.5 e può essere calcolato a partire dalle mappe mensili per le regioni d'interesse. Detto ora $\hat{x}(k,m)$ il valore mediano mensile a lungo termine di un dato pixel *k* e per un dato mese *m*, l'anomalia dell'indice NDVI $x'(k,m,y)$ può essere calcolata per ogni pixel *k*, mese *m* ed anno *y* come

$$x'(k,m,y) = [x(k,m,y) - \hat{x}(k,m)]\,. \qquad [3]$$

In altri termini, l'anomalia mensile rappresenta una misura dell'offset dell'NDVI per un dato pixel, mese ed anno rispetto al comportamento medio mensile a lungo termine. Tale anomalia può essere mediata spazialmente al fine di ottenere una serie di valori facilmente rappresentabili ed interpretabili.

Come accennato, tale metodologia si ispira a quella proposta da Myneni nel 1998 in cui però veniva utilizzato il valore medio al posto del valore mediano per caratterizzare il comportamento mensile a lungo termine. Si è ritenuto opportuno l'impiego del valore mediano poiché lo stesso risulta essere non influenzato da eventuali 'spike' che possono presentarsi nei dati ed alterare il valore medio mensile calcolato come media aritmetica.

Al fine di calcolare la media spaziale dell'anomalia $x'(k,m,y)$, si sono seguiti due degli approcci, proposti sempre da Myneni; essa cioè può essere calcolata:

1. considerando solo i pixel che hanno un corrispondente valore mediano mensile a lungo termine $\hat{x}(k,m)$ maggiore di una soglia prefissata. In tal modo i pixel considerati possono variare da mese a mese ma sono costanti negli anni. Tale metodo è detto appunto Vary Month Constant Year (VMCY) ed è indicato per individuare le fluttuazioni dell'NDVI dovute a variazioni climatiche poiché il numero di pixel considerato è costante negli anni per un dato mese e le variazioni non sono legate appunto alle stagioni.

2. considerando solo i pixel che hanno un corrispondente valore mediano mensile a lungo termine $\hat{x}(k,m)$ maggiore di una soglia prefissata nel mese di maggio (*k=5*). Tale metodo è detto Constant Month Years (CMY) poichè i pixel considerati nell'operazione di media

spaziale sono gli stessi al variare del mese e dell'anno. Questo modo di mediare dovrebbe evidenziare al contrario le anomalie dell'indice NDVI dovute alla stagionalità ed alle sue eventuali fluttuazioni negli anni.

Per quanto riguarda la soglia da utilizzare, essa è stata fissata in maniera tale da discriminare tra pixel cui corrisponde un'area vegetata da quelli corrispondenti ad area non vegetata. In particolare essa è stabilita in maniera empirica poiché non esiste un metodo analitico per stabilire tale valore; nel nostro caso la soglia è stata fissata a 0.1 considerando sia i valori tipici dell'indice NDVI calcolato secondo l'algoritmo MVC per il sensore AVHRR per vari tipi di suolo (Holben, 1986), sia i valori risultanti dall'analisi effettuata secondo il primo metodo descritto (vedi figura 1). Il mese di maggio è stato invece scelto come mese di riferimento poiché, per il Sud Italia, è in media il mese in cui la vegetazione totale è massima, così come si evidenzia analizzando la media spaziale del valore mediano mensile a lungo termine $\hat{x}(k,m)$ nei dodici mesi dell'anno.

Occorre osservare inoltre che nelle operazioni di media spaziale dell'anomalia mensile a lungo termine, si sono esclusi i pixel cosiddetti 'outlier', considerando solo i pixel la cui anomalia standardizzata $x_s'(k,m,y)$ risulta essere minore di $|3\sigma|$, dove l'anomalia standardizzata è calcolata attraverso la formula

$$x_s'(k,m,y) = [x(k,m,y) - \hat{x}(k,m)]/\sigma(k,m) \qquad [4]$$

in cui $\sigma(k,m)$ rappresenta la deviazione standard a lungo termine dell'NDVI mensile e σ la deviazione standard (su tutti e tre gli indici).

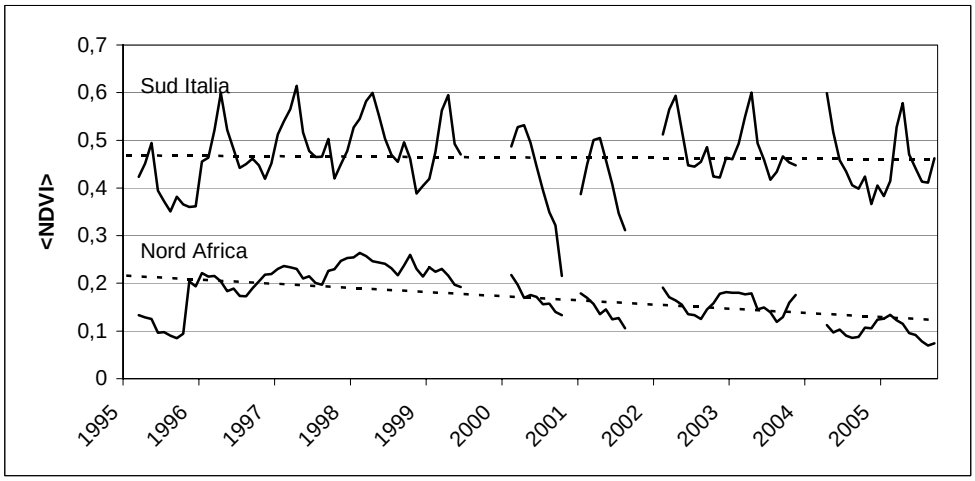

Figura 1 – Serie temporale dell'NDVI medio per il Sud Italia ed il Nord Africa

Per quanto concerne i dati di precipitazione, essi sono stati mediati spazialmente al fine di ottenere una serie temporale in accordo con il primo metodo di analisi dell'indice NDVI descritto in questa sezione; in questa fase si è proceduto a confrontare visivamente le curve ottenute con quelle della vegetazione, per il periodo che va dal 1993 al 2004 (risultati in figura 4).

Risultati

In figura 1 sono riportati i 'trend' di vegetazione ottenuti in accordo con il primo metodo di analisi proposto e cioè le curve rappresentano il 'trend' della media spaziale dell'NDVI nel periodo considerato. La curva superiore riguardante il Sud Italia mostra delle marcate oscillazioni stagionali con valori molto bassi negli autunni degli anni 1995, 2000 e 2001 mentre per entrambe le curve si

osserva una retta di regressione decrescente; tale 'trend' decrescente è molto più marcato per la regione del Nord Africa analizzata.
La figura 2 mostra le serie temporali dell'anomalia, ottenute mediante il metodo VYCM, mentre la figura 3 rappresenta le curve di anomalia ottenute con il metodo CMY. Le due curve ottenute con il metodo VYCM e CMY per il Sud Italia appaiono molto simili e ciò dimostra che i metodi sono, per la regione considerata, equivalenti. Per il Nord Africa invece le due curve di anomalia sono diverse, con differenze più marcate nei mesi invernali.
Infine, le figure 3 A e B rappresentano le curve di precipitazione a confronto con quelle dell'NDVI medio per le due regioni: si evidenzia, attraverso ispezione visiva, una forte e ritardata correlazione tra i due fenomeni.

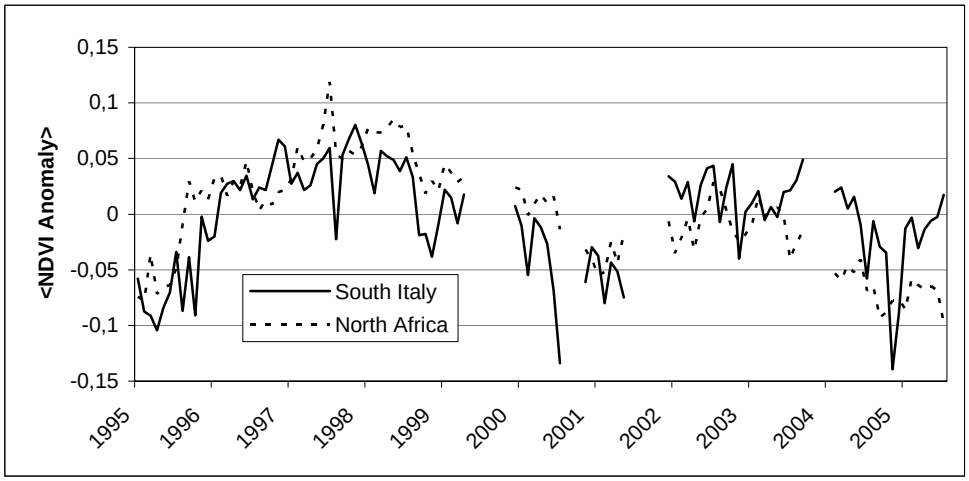

Figura 2 – Serie temporali della media spaziale dell'anomalia mensile a lungo termine dell'NDVI per il Sud Italia e per il Nord Africa calcolata con il metodo VYCM.

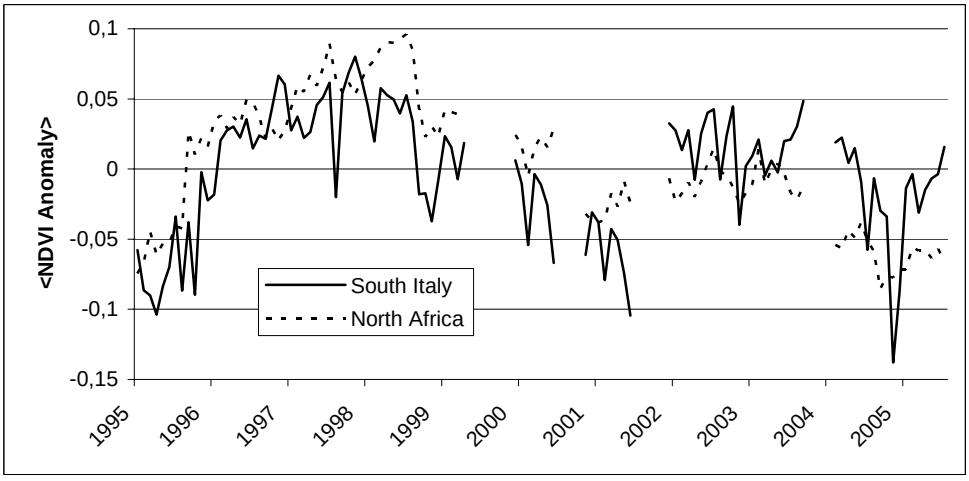

Figura 3 – Serie temporali della media spaziale dell'anomalia mensile a lungo termine dell'NDVI per il Sud Italia e per il Nord Africa calcolata con il metodo CMY.

Conclusioni

I risultati dell'analisi condotta in questo lavoro mostrano, per il periodo considerato, un moderato declino della vegetazione per il Sud Italia ed uno più marcato per il Nord Africa, assieme ad una evidente correlazione tra indice di vegetazione e precipitazioni. Alcuni aspetti rimangono tuttavia

da investigare, ed in particolare: (i) i bassi valori assunti dall'indice di vegetazione per il Sud Italia negli autunni degli anni 2000, 2001 e 2002 e la loro relazione con fattori ambientali; (ii) i picchi marcatamente negativi dell'anomalia dell'indice di vegetazione nell'autunno del 2001 e nel gennaio del 2005; (iii) una misura quantitativa del ritardo temporale tra le curve di precipitazione ed NDVI attraverso la funzione di cross-correlazione.
Si prevede inoltre, come ulteriore sviluppo futuro, l'impiego dell'indice NDVI derivato però dal sensore MODIS al fine di validare i risultati ottenuti a partire dalla data in cui è possibile produrre tale indice attraverso i dati acquisiti dallo stesso sensore a bordo dei satelliti AQUA e TERRA.

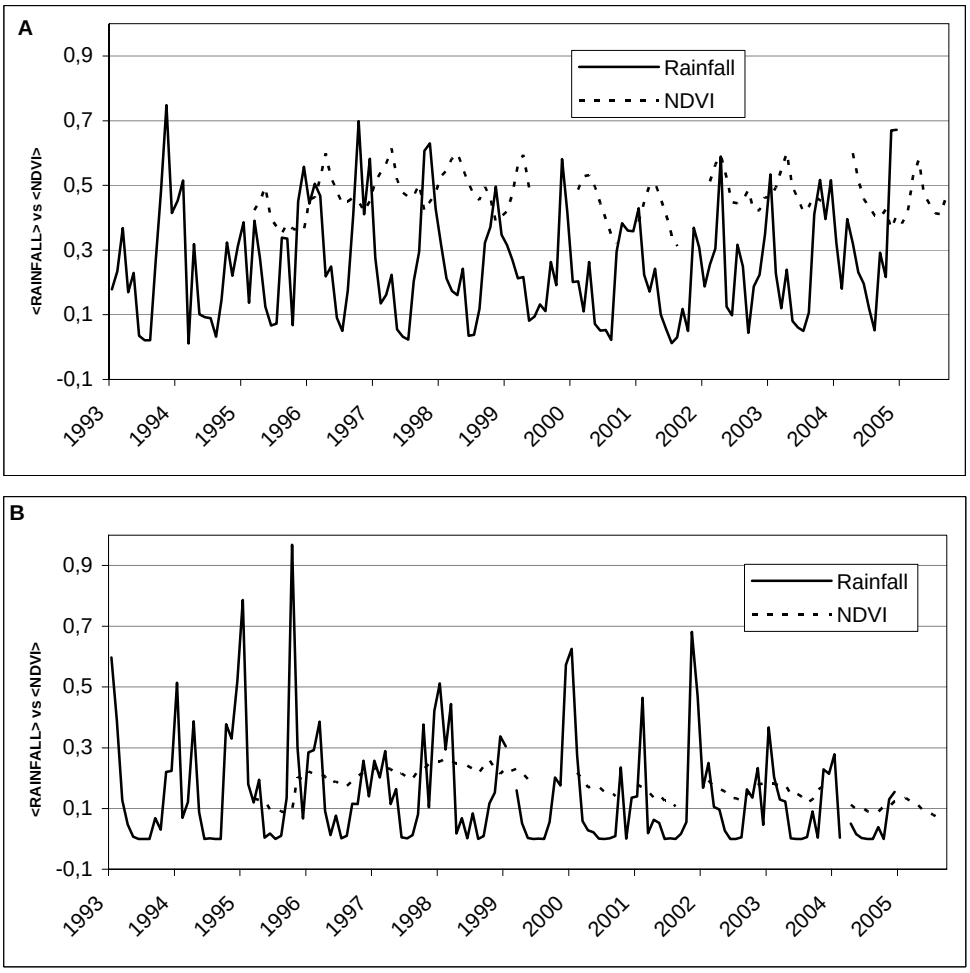

Figura 4 – Serie temporali delle precipitazioni medie e dell'NDVI medio per il Sud Italia (A) e per il Nord Africa (B). Le curve di precipitazione sono normalizzate rispetto al valore massimo per facilitarne il confronto.

Riferimenti bibliografici

B. N. Holben (1986), "Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data", *Int. J. Remote Sensing*, Vol.7, No. 11, pp.1417-1434, 1986.

R. B. Myneni, C. J. Tucker, G. Asrar, and C. D. Keeling (1998) "Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991", *J. Geophys. Res*. vol. 103, NO. D6, pp.6145-6160, 1998.