

GENERAZIONE DI CARTE TEMATICHE DELLA VEGETAZIONE DA DATI TELERILEVATI

Ciro FAELLA, Margherita FIANI, Pasquale PISTILLO

Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Salerno, Via Ponte Don Melillo 1, 84084 Fisciano (SA)
(c.faella, m.fiani, ppistill)@unisa.it

Riassunto

Sfruttando l'alta risoluzione spettrale delle immagini che vengono trasmesse quotidianamente dal sensore MODIS, installato sui satelliti Terra e Aqua, all'antenna in banda X del ReSLEHM (il Centro di Telerilevamento dell'Ateneo di Salerno) è stato possibile calcolare degli opportuni indici di vegetazione che hanno fornito utili informazioni circa la distribuzione e l'evoluzione delle aree vegetate nel bacino del Mediterraneo. Tramite la combinazione mirata di indicatori appartenenti a tre diverse classi: la Greenness, la Canopy Water e la Light Use Efficiency, è stato valutato, utilizzando il software ENVI, lo stato di salute e lo stress della vegetazione. Gli indici prescelti infatti sono in grado di fornire informazioni riguardanti la copertura complessiva delle aree vegetate e il suo stato di salute, la quantità di acqua presente nelle foglie e la capacità di utilizzo della luce da parte della vegetazione per compiere la fotosintesi clorofilliana. Tali analisi si basano sulla conoscenza del grado di assorbimento dell'energia luminosa da parte della vegetazione: quella sana riflette una percentuale dell'energia incidente variabile dal 40% al 50% nelle bande corrispondenti al vicino infrarosso, la clorofilla presente assorbe circa l'85% dell'energia nel campo del visibile (con un picco di riflettanza nel verde) mentre la vegetazione morta o senescente si comporta in modo opposto. L'algoritmo implementato in ENVI, utilizzando una combinazione di indici provvede inoltre a una classificazione automatica del livello di stress della vegetazione e permette di generare in modo semi-automatico utili carte tematiche da satellite rappresentanti la copertura e la qualità della vegetazione nell'area di studio.

Abstract

Using the high spectral resolution of the images which are daily acquired by the MODIS sensor, settled on satellite platforms Terra and Aqua, and sent in real time to the antennas in X-bandas of the ReSLEHM (Remote Sensing Laboratory for Environmental Hazard Monitoring) of the University of Salerno, it has been possible to calculate appropriate Vegetation Indices that supplied useful information about the spatial distribution and the evolution of the vegetate areas in the Mediterranean Basin. Through the combination of a number of indicators propers to three different classes: Greenness, Canopy Water and Light Use Efficiency; it has been evaluated, by means of ENVI software, the vegetation stress. The chosen indices are really able to supply information about the general cover of the vegetative areas and their state of health, the water quantity in the canopy and the efficiency with which the vegetation is able to use light for photosynthesis. Such analysis are based on the capacity of the vegetation in absorbing the solar radiation: the leaves which are in good health condition reflect a portion of incident energy varying between 40 and 50% in the near infrared bands, the chlorophyll absorbs the 85% in the visible range (with the highest reflectance value in the Green band) while the senescent or died vegetation reflect in the opposite way. The algorithm which is implemented in ENVI uses a combination of indices in order to create a spatial map showing the distribution of agricultural stress

Introduzione

I Sistemi Satellitari, a partire dalla messa in orbita del sensore AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), installato sui satelliti NOAA, e successivamente con il LandSat TM e il MODIS, sono ormai in grado di acquisire con continuità dati di radianza riguardanti la superficie terrestre, in diverse condizioni di inclinazione del sole e irraggiamento.

Tali dati, una volta georeferenziate le immagini e corretti per gli effetti di disturbo quali ad esempio l'aerosol atmosferico, consentono un monitoraggio globale della superficie terrestre, mari inclusi, e dell'atmosfera intorno ad essa. A questo scopo, il MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*) è ad oggi uno dei sistemi maggiormente utilizzati dalla NASA per la sua alta risoluzione sia spettrale (trentasei canali) che spaziale (due canali a 250m, cinque a 500m e ventinove a 1Km). Grazie ai due satelliti sui quali è installato il sensore, Terra e Aqua, che si muovono su due orbite leggermente diverse (discendente il primo e ascendente il secondo), e allo swath (2330Km *across track* e 10Km *along track*), la copertura garantita è di quattro passaggi giornalieri su tutto il globo. Tramite l'elaborazione dei dati multispettrali MODIS ricevuti dall'antenna in banda X del ReSLEHM (*Remote Sensing Laboratory for Environmental Hazard Monitoring*) dell'Università di Salerno, è stato possibile individuare degli indici di vegetazione che hanno fornito utili informazioni circa la copertura e lo stato di salute delle aree vegetate.

Indici di Vegetazione

Molte superfici naturali presentano una risposta molto simile nelle porzioni del rosso (*RED*) e del vicino infrarosso (*NIR*) dello spettro elettromagnetico; una notevole eccezione è rappresentata dalla vegetazione verde. La luce rossa è infatti fortemente assorbita dai pigmenti fotosintetici (quale la clorofilla a) che si trovano nel fogliame verde mentre la luce vicino-infrarossa o viene assorbita o viene riflessa dalla vegetazione vitale, indipendentemente dal suo colore. Ciò significa che le zone di terreno nudo coperte da poco o nessun materiale vegetale sembreranno simili sia nelle lunghezze d'onda corrispondenti al *RED* che al *NIR*, mentre le zone con molta vegetazione verde saranno molto luminose nel vicino-infrarosso e molto scure nella porzione rossa dello spettro.

Di conseguenza, se a una immagine "*RED*" viene sottratta l'immagine "*NIR*", qualsiasi cosa abbia un livello di luminosità simile nelle due lunghezze d'onda diventa scuro mentre tutto quello che sia più luminoso nel vicino-infrarosso diventa chiaro.

I sensori a bordo dei satelliti misurano la luce come numero digitale (DN). Se questi sensori sono calibrati, il DN può essere convertito in radianza, cioè la quantità di luce che viene riflessa da una superficie. Se la densità di flusso radiante è nota, la riflettanza della superficie può essere calcolata come radianza divisa per la densità del flusso più una compensazione per l'atmosfera all'istante in cui l'immagine è acquisita. La riflettanza è di gran lunga il valore più difficile da ottenere, ma è anche il più importante poiché rappresenta una caratteristica propria della superficie, non influenzata dall'intensità della luce che la colpisce. Gli Indici di Vegetazione (*Vegetation Indices – VIs*) sono degli algoritmi che combinano i valori di riflettanza della superficie in due o più lunghezze d'onda, allo scopo di evidenziare una particolare proprietà della vegetazione. Più di 150 VIs sono stati pubblicati nella letteratura scientifica ma solo una piccola parte hanno solide basi biofisiche o sono stati sistematicamente testati (Asner, 1998). Il programma utilizzato per la sperimentazione, ENVI ver. 4.3. ne implementa ventisette, raggruppati nelle seguenti sette categorie:

- *Broadband Greenness*
- *Narrowband Greenness*
- *Light Use Efficiency*
- *Canopy Nitrogen*
- *Dry or Senescent Carbon*
- *Leaf Pigments*
- *Canopy Water Content*

Nella tabella 1 sono riportati solo gli Indici di Vegetazione calcolabili sui dati acquisiti dal sensore

MODIS e il *range* dei valori. Nelle equazioni, la lettera greca ρ indica la riflettanza. Da sottolineare che gli indici della vegetazione che non vengono calcolati usando la riflettanza non forniscono risultati consistenti se usati per confrontare immagini della stessa zona riprese in due date differenti.

Classe	Nome Indice	Algoritmo	Range valori
BROADBAND GREENNESS	Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$	-1÷1
	Simple Ratio Index	$SRI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}$	0÷30 e oltre
	Enhanced Vegetation Index	$EVI = 2.5 \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + 6\rho_{RED} - 7.5\rho_{BLUE} + 1} \right)$	-1÷1
	Atmospherically Resistant Vegetation Index	$ARVI = \frac{\rho_{NIR} - (2\rho_{RED} - \rho_{BLUE})}{\rho_{NIR} + (2\rho_{RED} - \rho_{BLUE})}$	-1÷1
	Sum Green Index	SGI	0÷50 e oltre
LIGHT USE EFFICIENCY	Photochemical Reflectance Index	$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}}$	-1÷1
DRY OR SENESCENT CARBON	Plant Senescence Reflectance Index	$PSRI = \frac{\rho_{680} - \rho_{500}}{\rho_{750}}$	-1÷1
CANOPY WATER CONTENT	Water Band Index	$WBI = \frac{\rho_{900}}{\rho_{970}}$	
	Normalized Difference Water Index	$NDWI = \frac{\rho_{857} - \rho_{1241}}{\rho_{857} + \rho_{1241}}$	-1÷1

Tabella 1 – Indici di Vegetazione calcolabili sui dati MODIS

Dati utilizzati per la sperimentazione

I dati rilevati tramite MODIS sui satelliti Terra ed Aqua sono direttamente trasmessi ai siti muniti di appositi sistemi riceventi (antenna in banda X, sistema di analisi e decodifica). Tali dati sono privi di qualsiasi tipo di correzione, contengono quindi solo le misure “grezze” oltre alle informazioni di telemetria per il satellite Terra e vengono distribuiti in formato PDS; la telemetria per Aqua è fornita in un file distinto. I dati MODIS ottenuti dal sistema di *download* (*Level 0*) non sono però direttamente utilizzabili ed è pertanto necessario effettuare tutta una sequenza di operazioni in modo da convertirli in altri formati comunemente adoperati da software commerciali quale ad esempio ENVI, utilizzato per la sperimentazione, e renderli così direttamente impiegabili nelle successive fasi di elaborazione e analisi. Il primo passaggio necessario consiste nel convertire i *raw data* dal formato PDS nel formato HDF stabilito dallo standard EOS, denominato *Level 1A* o MOD01 (nel caso di Aqua, MYD01). Il file di tipo MODIS *level-1A* contiene i dati non corretti, la telemetria e informazioni sulla qualità dei dati. A partire dal MOD01 è possibile determinare le effemeridi del sensore, con un’accuratezza variabile da 500m a 1000m a seconda se la telemetria è di tipo *broadcast* oppure post-elaborata; esse sono contenute in un file formato HDF appartenente al *Level 1B*, denominato MOD03. La conoscenza delle effemeridi viene utilizzata al fine di produrre quattro ulteriori file di *Level 1B*, denominati MOD02 (tabella 2).

MOD02QKMyyyyymmddhhmm	File di dati calibrati contenente le bande 1 e 2, a 250m di risoluzione
MOD02HKMyyyyymmddhhmm	File di dati calibrati contenente le bande 3÷7 a 500m di risoluzione e le Bande 1 e 2 ricampionate a 500m.
MOD021KMyyyyymmddhhmm	File di dati calibrati contenente tutte le bande a 1000m contenenti la Riflettanza (bande 8÷19 e 26) ed Emissività (bande 20÷36, esclusa la 26) a 1000m di risoluzione e le bande 1÷7 ricampionate a 1000m.
MOD02OBCyyyymmddhhmm	File di dati riguardanti la calibrazione, estratti dal <i>Level 1°</i>

Tabella 2 – File MOD02 - Level 1B

I file MOD02 contengono informazioni riguardanti la riflettanza della superficie terrestre; tali informazioni sono calibrate cioè corrette da alcuni errori sistematici legati al sensore e altri legati al tipo di piattaforma e al suo movimento. A partire da questo livello di dato se ne possono ottenere molti altri, funzionali al tipo di indagine che si vuole effettuare, nel caso di studio legato alla vegetazione. Per poter essere utilizzati al fine di determinare valori corrispondenti alle reali caratteristiche della vegetazione, i dati devono essere ora ulteriormente corretti sia per l’influenza

dell'atmosfera che del terreno. In particolare, la presenza dell'atmosfera modifica la risposta delle bande corrispondenti al rosso (*RED*) e al vicino infrarosso (*near infrared – NIR*) cioè quelle più sensibili alla vegetazione. La seconda correzione invece viene utilizzata per accentuare la risposta della vegetazione rispetto a quella del terreno e viene principalmente utilizzata in presenza di vaste zone desertiche o nell'area circumpolare. Al fine di applicare le correzioni riguardanti l'atmosfera è possibile utilizzare alcuni prodotti correlati ricavabili dai file MOD02; in particolare, si possono ricavare i prodotti *Level-2* denominati MOD35 e MOD14, che forniscono rispettivamente informazioni riguardanti la posizione delle masse nuvolose e la temperatura della superficie terrestre. Con tali informazioni aggiuntive è possibile determinare e di conseguenza escludere le aree coperte da nubi e anche valutare la presenza di temperature anomale in grado di determinare fenomeni locali di distorsione. Nello standard dei prodotti MODIS forniti dalla NASA tali correzioni sono effettuate con l'ausilio dell'*Atmospheric Correction Algorithm Products* (anche denominato *Spectral Reflectance*) che fornisce in output il file denominato MOD 09. Per tale file il valore di radianza per le bande dalla 1 alla 7 (centrate rispettivamente a 648, 858, 470, 555, 1240, 1640 e 2130nm) viene corretto al fine di eliminare gli effetti causati dall'assorbimento di ozono e dallo scattering atmosferico. A partire da tale file appartenente al *Level-2* sono infine calcolati altri prodotti, distribuiti con la sigla MOD 13 e classificati di *Level-3*, ottenuti applicando ai dati raccolti in otto o sedici giorni di osservazioni dei filtri in funzione di parametri tra cui la qualità delle osservazioni, la presenza di nuvole e la geometria di presa, in modo da ottenere il set migliore di dati sui quali sono calcolati alcuni indici di vegetazione, tra cui NDVI e EVI. La *suite* utilizzata per ottenere tutti i prodotti descritti in questo lavoro è IMAPP ver.1.5, sviluppata dal CIMSS (*Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies*) dell'Università del Wisconsin-Madison in collaborazione con la NASA. IMAPP è composto da diversi programmi che consentono in modo sequenziale di ottenere i prodotti descritti. E' importante far notare che la versione HDF prodotta utilizzando tali programmi si discosta leggermente dallo standard EOS previsto per i sistemi MODIS. E' tuttavia interessante notare che, nel caso non siano disponibili le effemeridi dei satelliti Terra e Aqua, è possibile utilizzare file esterni, quali ad esempio le *Two Line Ephemeridis* fornite dalla NASA, mantenendo la tolleranza nei *range* previsti dagli standard NASA (Strabala, 2002). Se non è disponibile il programma ufficiale della NASA, è possibile alternativamente utilizzare il programma *Corrected Reflectance Algorithm - crefl* sviluppato da Descloitres presso il GSFC della NASA (Gumley et al., 2003.), che fornisce risultati molto simili a quelli MOD09, se la presenza dell'aerosol nell'atmosfera è trascurabile, come normalmente è alle nostre latitudini. Tali correzioni atmosferiche sono applicate solo alle prime sette bande.

Calcolo degli indici di vegetazione

Nella prima fase della sperimentazione si sono analizzate le differenze e le peculiarità dei diversi indici ottenuti partendo dai dati forniti dal sensore MODIS installato sui satelliti Terra e Aqua, rispettivamente nei passaggi delle 09:14 del 3 Settembre 2006 e delle 11:43 del 13 maggio 2006. Partendo dai seguenti file MODIS *Level-1B*:

- MOD02QKM200609030914; MOD02QKM200605131143
- MOD02HKM200609030914; MOD02HKM200605131143
- MOD021KM200609030914; MOD021KM200605131143

è possibile calcolare gli Indici di Vegetazione riportati in tabella 3.

Tali indici sono stati calcolati sia sulle intere scene che su tre sottoaree aventi differenti gradi di copertura vegetativa; in particolare, si sono prese in esame un'area totalmente vegetata, una quasi totalmente priva di vegetazione e una zona urbanizzata. Tutte le aree hanno una estensione di circa 49.5 km², a eccezione dell'area urbana (città di Salerno) di minore estensione (26.7 x 35.7 Km²).

Per ottenere dai dati MODIS informazioni sulla vegetazione con risoluzione di 250m al suolo sono utilizzabili solo due indici, NDVI e SRI, che possono essere calcolati utilizzando i primi due canali del sensore, aventi lunghezze d'onda nelle bande del visibile e del NIR.

Dato di Partenza	Indici Calcolati	Canali utilizzati
MOD02QKM20060609030914 MOD02QKM200605131143	NDVI SRI	B01 ; B02 B01 ; B02
MOD02HKM200609030914 MOD02HKM200605131143	NDVI SRI EVI ARVI NDWI	B01 ; B02 B01 ; B02 B01 ; B02 ; B03 B01 ; B02 ; B03 B02 ; B05
MOD021KM200609030914 MOD021KM200605131143	NDVI SRI EVI ARVI SGI PRI PSRI WBI NDWI	B01 ; B02 B01 ; B02 B01 ; B02 ; B03 B01 ; B02 ; B03 B01 ; B04 ; B11 ; B12 B04 ; B011 B01 ; B010 ; B15 B17 ; B19 B02 ; B05

Tabella 3 – Indici di Vegetazione calcolabili con ENVI su dati multispettrali MODIS

Se si utilizzano, oltre alle prime due ricampionate a 500m, anche le bande dei canali 3÷7 del MODIS con risoluzione di 500m, è possibile calcolare, in aggiunta ai precedenti indici, anche EVI, ARVI e NDWI. Utilizzando infine tutti i canali del MODIS, è possibile calcolare nove Indici di Vegetazione, tramite i quali produrre carte tematiche di stress. In tabella 4 sono riportate le statistiche sugli indici per quanto riguarda i dati a risoluzione di 1km; le statistiche per gli indici calcolabili a 250 e 500m sono del tutto simili e perciò non si riportano.

13 maggio 2006										3 settembre 2006								
NDVI	SRI	EVI	ARVI	SGI	PRI	PSRI	WBI	NDWI		NDVI	SRI	EVI	ARVI	SGI	PRI	PSRI	WBI	NDWI
0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	-1,000	-1,000	0,170	-0,809	Min	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	-0,999	-1,000	1,096	
0,834	11,023	1,000	1,000	0,132	0,603	1,000	2,971	0,742	Max	0,820	10,128	0,908	1,000	0,132	0,087	0,999	2,397	
0,363	2,587	0,385	0,632	0,093	-0,004	-0,203	1,514	0,132	Media	0,362	2,531	0,295	0,455	0,084	0,015	-0,068	1,647	
0,214	1,421	0,281	0,217	0,021	0,051	0,347	0,168	0,133	Dev st	0,194	1,405	0,184	0,272	0,019	0,029	0,186	0,166	
FULL SCENE																		
0,009	1,018	0,006	0,323	0,010	-0,002	-0,808	1,534	-0,242	Min	0,002	1,003	0,001	0,367	0,000	0,021	0,006	1,706	
0,654	4,780	0,657	0,997	0,121	0,038	-0,014	1,732	0,298	Max	0,721	6,169	0,831	0,997	0,126	0,060	0,792	2,075	
0,384	2,385	0,358	0,589	0,099	0,007	-0,301	1,664	0,106	Media	0,407	2,564	0,414	0,630	0,103	0,028	0,044	1,914	
0,132	0,693	0,136	0,129	0,018	0,006	0,225	0,042	0,080	Dev st	0,137	0,879	0,162	0,147	0,013	0,005	0,074	0,060	
AREA TEST URBANA																		
0,055	1,117	0,013	0,000	0,000	-0,955	-0,466	0,998	-0,117	Min	0,141	1,328	0,074	0,001	0,001	-0,010	-0,089	1,287	
0,598	3,981	0,868	0,845	0,123	0,028	0,995	1,608	0,190	Max	0,483	2,871	0,331	0,623	0,120	0,027	0,008	1,553	
0,336	2,082	0,391	0,445	0,090	-0,018	-0,027	1,418	0,017	Media	0,247	1,673	0,161	0,140	0,093	0,006	-0,036	1,427	
0,100	0,468	0,167	0,140	0,037	0,114	0,200	0,102	0,039	Dev st	0,054	0,215	0,033	0,098	0,016	0,008	0,016	0,054	
AREA TEST ARIDA																		
0,026	1,053	0,005	0,003	0,000	-0,964	-0,767	1,237	-0,143	Min	0,299	1,854	0,121	0,369	0,060	-0,016	0,000	1,351	
0,766	7,559	0,907	0,990	0,121	0,020	0,663	1,549	0,541	Max	0,797	8,839	0,743	0,975	0,108	0,038	0,100	1,806	
0,523	3,457	0,512	0,641	0,095	-0,018	0,028	1,418	0,034	Media	0,604	4,171	0,504	0,710	0,077	0,002	0,041	1,621	
0,128	1,055	0,148	0,163	0,014	0,042	0,188	0,066	0,072	Dev st	0,057	0,810	0,068	0,093	0,006	0,006	0,039	0,088	
AREA TEST VEGETATA																		

Tabella 4 – Statistica valori indici di vegetazione - 1km risoluzione

Analizzando i valori assunti dagli indici per una stessa scena, si noti che NDVI, SRI, EVI e ARVI, appartenenti alla classe *BroadBand Vegetation*, raggiungono un massimo nell'Area Test Vegetata e un minimo per l'Area Arida, priva di vegetazione mentre si hanno valori intermedi tra i due per l'Area Urbanizzata, come era atteso. Si noti anche l'incremento dei valori di questi indici da maggio a settembre per la Zona Vegetata e viceversa la riduzione per la Zona Arida. I valori assunti sono in ogni caso ampiamente nei *range* riportati in letteratura. Gli altri indici appaiono invece molto meno sensibili alla quantità di vegetazione presente nelle aree indagate e inoltre i risultati sono spesso inficiati dalla presenza di numerose aree in cui i dati non sono disponibili (zone in nero), in particolare per PRI e PSRI. In figura 5 sono visibili le immagini rappresentative degli indici calcolati sulle Aree Test; la scala di colore va dal nero (valori bassi) al bianco (valori alti).

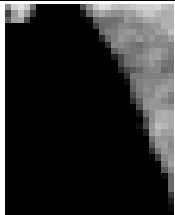
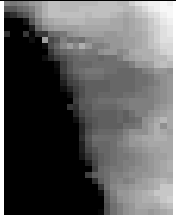
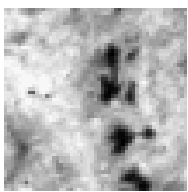
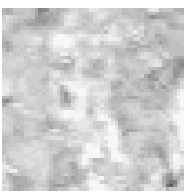
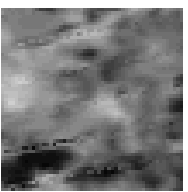
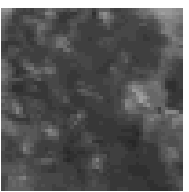
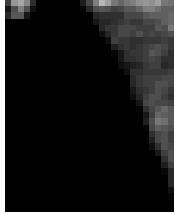
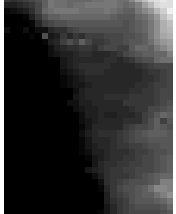
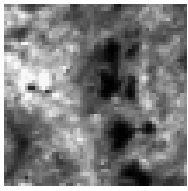
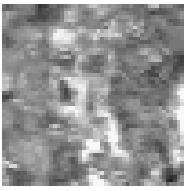
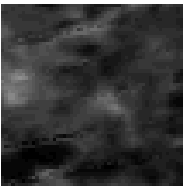
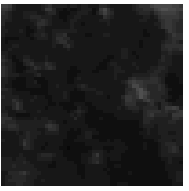
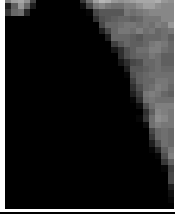
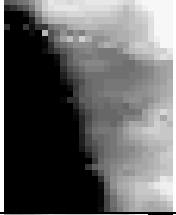
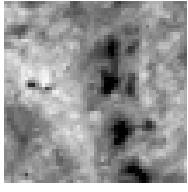
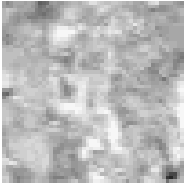
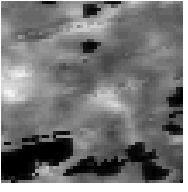
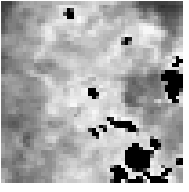
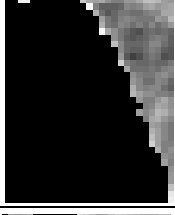
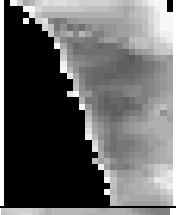
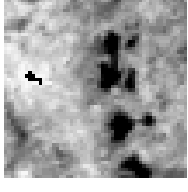
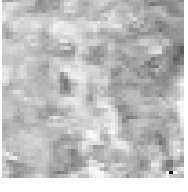
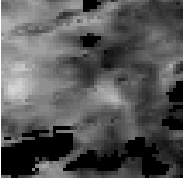
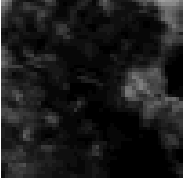
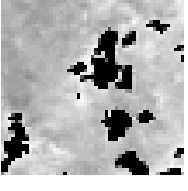
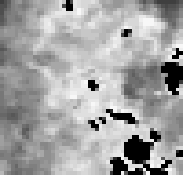
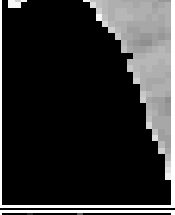
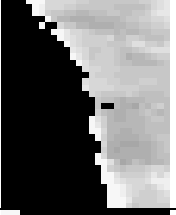
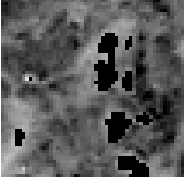
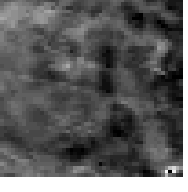
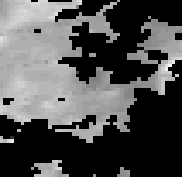
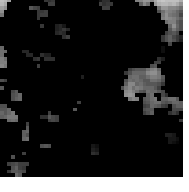
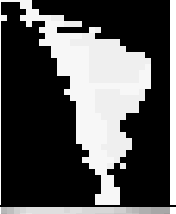
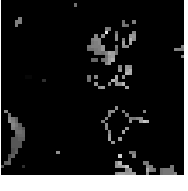
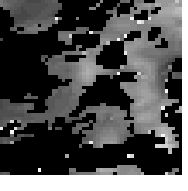
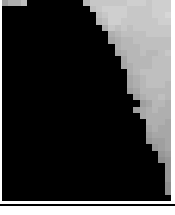
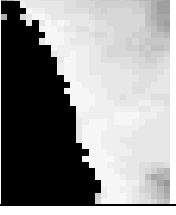
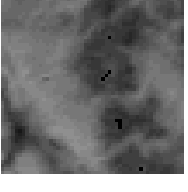
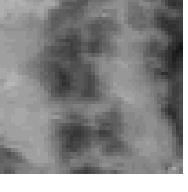
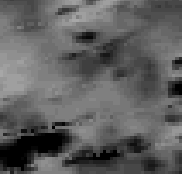
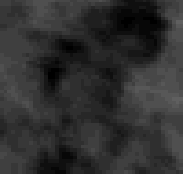
	Area Urbana		Area Vegetata		Area Arida	
	13 maggio 2006	3 settembre2006	13 maggio 2006	3 settembre2006	13 maggio 2006	3 settembre2006
NDVI						
SRI						
EVI						
ARVI						
SGI						
PRI						
PSRI						
WBI						

Figura 5 - Indici vegetazione sulle Aree Test - 1km risoluzione

Analizzando la rappresentazione grafica, sull'Area Vegetata si nota una sostanziale similitudine tra i risultati ottenuti con i primi quattro indici, anche se EVI e ARVI sembrano più sensibili alle naturali variazioni delle singole specie vegetate rispetto a NDVI e SRI, che sono prossimi a valori di saturazione.

Anche sull'Area Test Arida, EVI e ARVI sono risultati maggiormente sensibili all'individuazione delle modeste disomogeneità all'interno dell'area rispetto agli altri due indici.

Tali valutazioni di carattere puramente qualitativo sono anche suffragate dall'analisi degli istogrammi di frequenza dei valori assunti dagli indici nelle due aree, presentati in Figura 6. Si noti infatti che il *range* dei valori è più stretto per NDVI e SRI rispetto a EVI e ARVI. Si noti anche che il *range* tende a ridursi da maggio a settembre nella zona arida mentre nella zona vegetata accade il contrario solo per EVI e ARVI e ciò rispecchia la natura, dato che è sicuramente plausibile che dopo il periodo estivo si abbia una omogeneizzazione del terreno nelle zone aride e al contrario una forte variegazione nelle zone vegetate. Si conferma dunque il miglior comportamento di EVI e ARVI rispetto al NDVI e SRI in queste ultime zone.

I rimanenti indici si dimostrano, così come noto, di poco interesse se analizzati singolarmente. Essi saranno comunque utilizzati in combinazione con i primi perché forniscono informazioni indispensabili per l'elaborazione di carte tematiche sulla vegetazione. L'unico indice tra questi di qualche interesse è WBI che, essendo una misura di riflettanza sensibile alla variazione del contenuto d'acqua nella vegetazione, fornisce informazioni sulla distribuzione delle zone aride e sulla loro evoluzione.

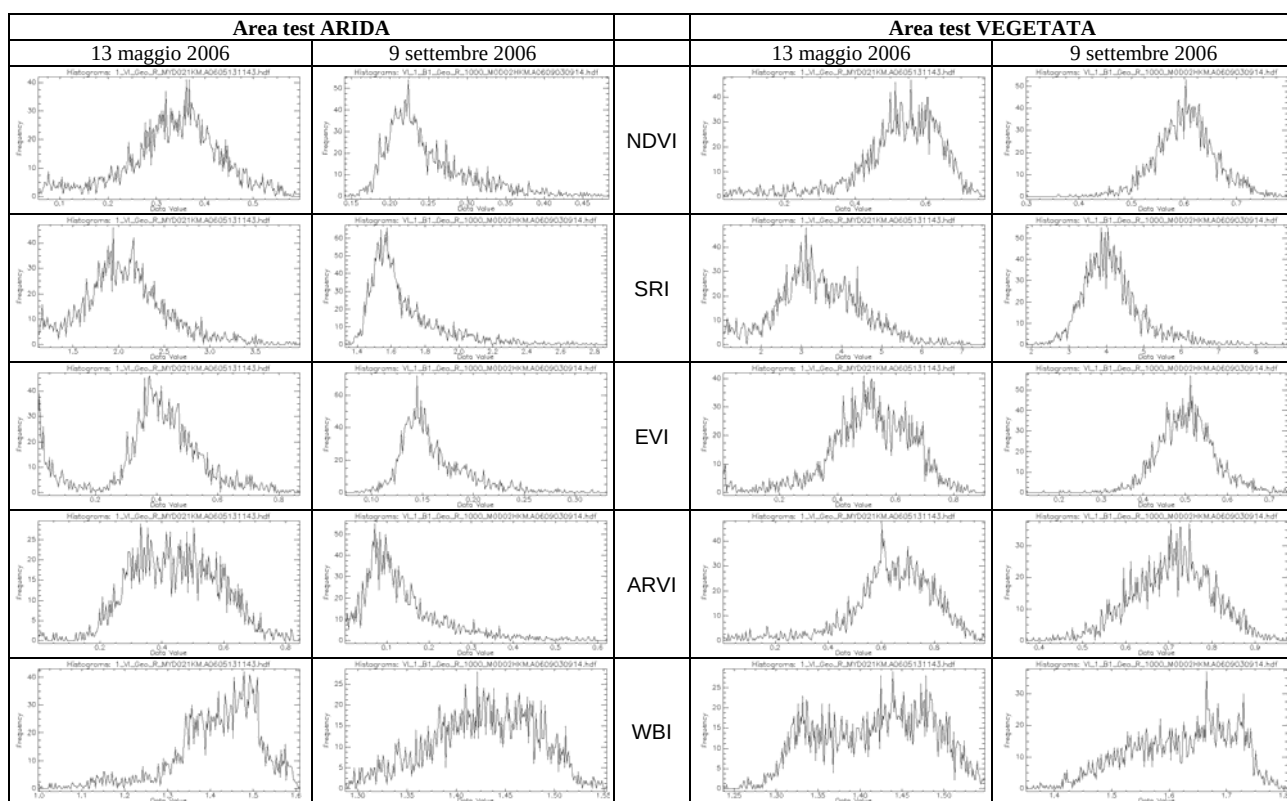


Figura 6 - Istogrammi di frequenza dei valori degli indici di vegetazione su Aree Test

Carte tematiche della vegetazione

Utilizzando gli indici di vegetazione calcolati è possibile ottenere, utilizzando l'*Agricultural Stress Tool* implementato in ENVI, carte tematiche rappresentative dello stress a cui è sottoposta la vegetazione, ove per stress si intende il suo stato di salute generale. Sebbene l'algoritmo sia stato studiato per supportare analisi riguardanti l'agricoltura, funziona altrettanto bene in presenza di

foreste, dal momento che le condizioni di stress sono praticamente le stesse sia nel caso delle colture che degli alberi.

In particolare, utilizzando almeno tre indici appartenenti alle classi: *Greenness*, *Canopy Nitrogen* o *Canopy Water*, *Light Use Efficiency* o *Leaf Pigments* è possibile combinare le informazioni riguardanti:

- la copertura complessiva delle aree coltivate o comunque vegetate e il loro vigore,
- la concentrazione dell'azoto nel fogliame e la quantità di acqua presente,
- la capacità di utilizzo della luce da parte della vegetazione per compiere la fotosintesi clorofilliana,

al fine di ottenere un quadro di sintesi sullo stato di salute della vegetazione nell'area ripresa.

Nel caso di studio, gli indici utilizzati come dati di input per l'analisi sono, per la classe *Greenness* NDVI, SRI, EVI, ARVI, per la classe *Canopy Water* il WBI e infine il PRI per la *Light Use Efficiency*. L'algoritmo opera combinando i diversi dati e fornisce i risultati divisi in nove classi, da basso stress in colore blu ad alto stress in colore rosso.

In figura 7 sono mostrate le carte tematiche ottenute per maggio e settembre sull'intera scena e sulle sottoaree, utilizzando per la classe *Greenness* tutti i quattro indici disponibili, al fine di confrontare i risultati.

In figura sono riportati anche i risultati ottenuti sull'area urbana, pur se non particolarmente significativi, essendo il *tool* dedicato all'analisi delle aree vegetate ed essendo viceversa tale area ovviamente quasi priva di vegetazione.

Si osservi in particolare la carta ottenuta utilizzando SRI, ove l'area urbana è erroneamente rappresentata con il colore nero, corrispondente a una mancanza di dato mentre per la zona coperta dal mare il livello di stress è calcolato. Negli altri casi si osserva invece una ovvia assenza di variazioni di rilievo tra maggio e settembre. Si noti infine che l'area costiera è indicata in rosso solo per le carte ottenute con NDVI e EVI mentre appare colorata in celeste per quella ricavata con ARVI; ciò è dovuto alla "correzione" effettuata da questo indice nella banda del *Blue* che causa uno *smoothing* nella zona costiera.

Osservando l'area test vegetata, si nota che nelle immagini di settembre i risultati sono del tutto simili (livelli bassi di stress) ad eccezione della carta ottenuta con ARVI mentre i risultati di maggio sono abbastanza diversi tra loro, probabilmente per la diversa sensibilità degli indici alle perturbazioni atmosferiche, in particolare alla presenza di aerosol e vapor d'acqua. Se si osserva infatti l'immagine RGB, si nota che le evidenti "macchie" di colore diverso dal fondo situate in basso a sinistra e nella fascia centrale della carta tematica corrispondono a nuvole che oscurano l'immagine.

In generale si nota comunque un incremento della condizione di stress nell'immagine di maggio rispetto a quella di settembre, maggiormente evidente nelle mappe ottenute utilizzando NDVI e ARVI. Per l'area arida, infine, i risultati ottenuti al variare dell'indice appartenente alla classe *Greenness* sono completamente diversi l'uno dall'altro, pur se in tutti i casi si evidenzia una sensibile variazione del livello di stress della vegetazione da maggio a settembre, cosa questa plausibile essendo il primo dato antecedente il periodo caldo estivo mentre il secondo subito successivo.

Ad esempio, se si prende in esame la carta tematica di maggio ricavata utilizzando NDVI, si osserva come il risultato sia del tutto inconfondibile con quelli ottenuti a partire dagli altri indici; in questa immagine vi sono infatti alcune zone (in nero) nelle quali non è stato possibile calcolare l'indice PRI essendo prive di dati nelle bande utilizzate per la sua stima.

Si nota comunque una sostanziale differenza anche tra le carte ottenute con i dati di settembre, soprattutto in quella ottenuta utilizzando SRI che anche in questo caso, così come nell'area urbana, dà risultati probabilmente inattendibili.

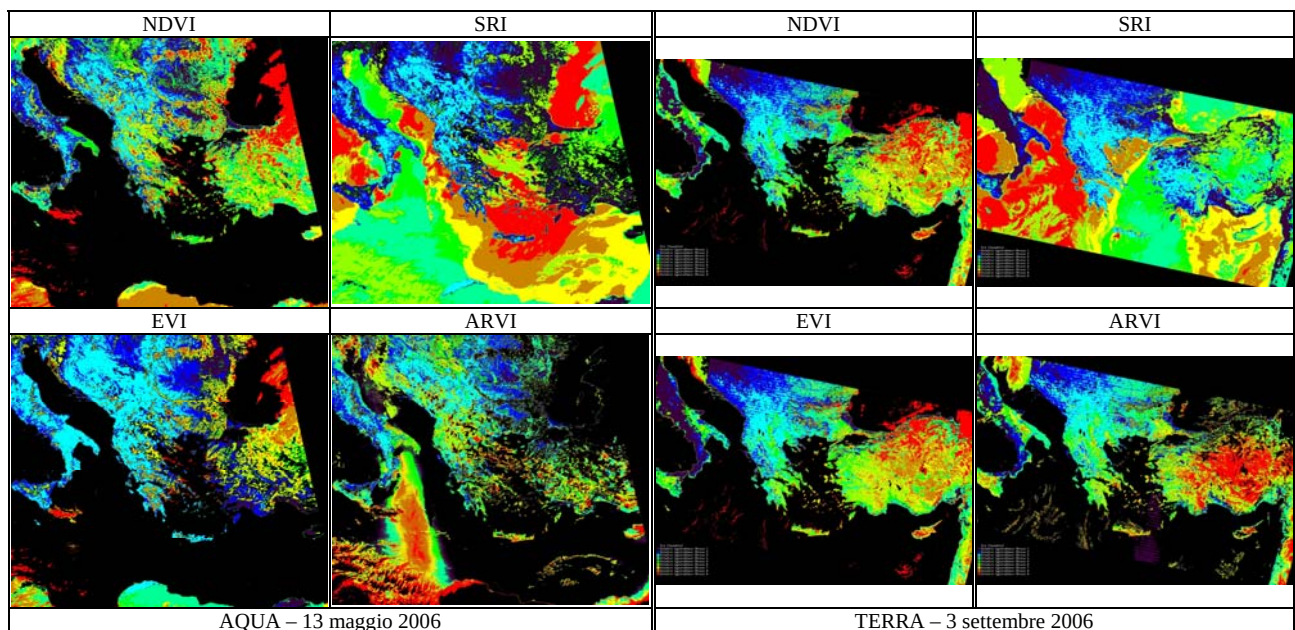
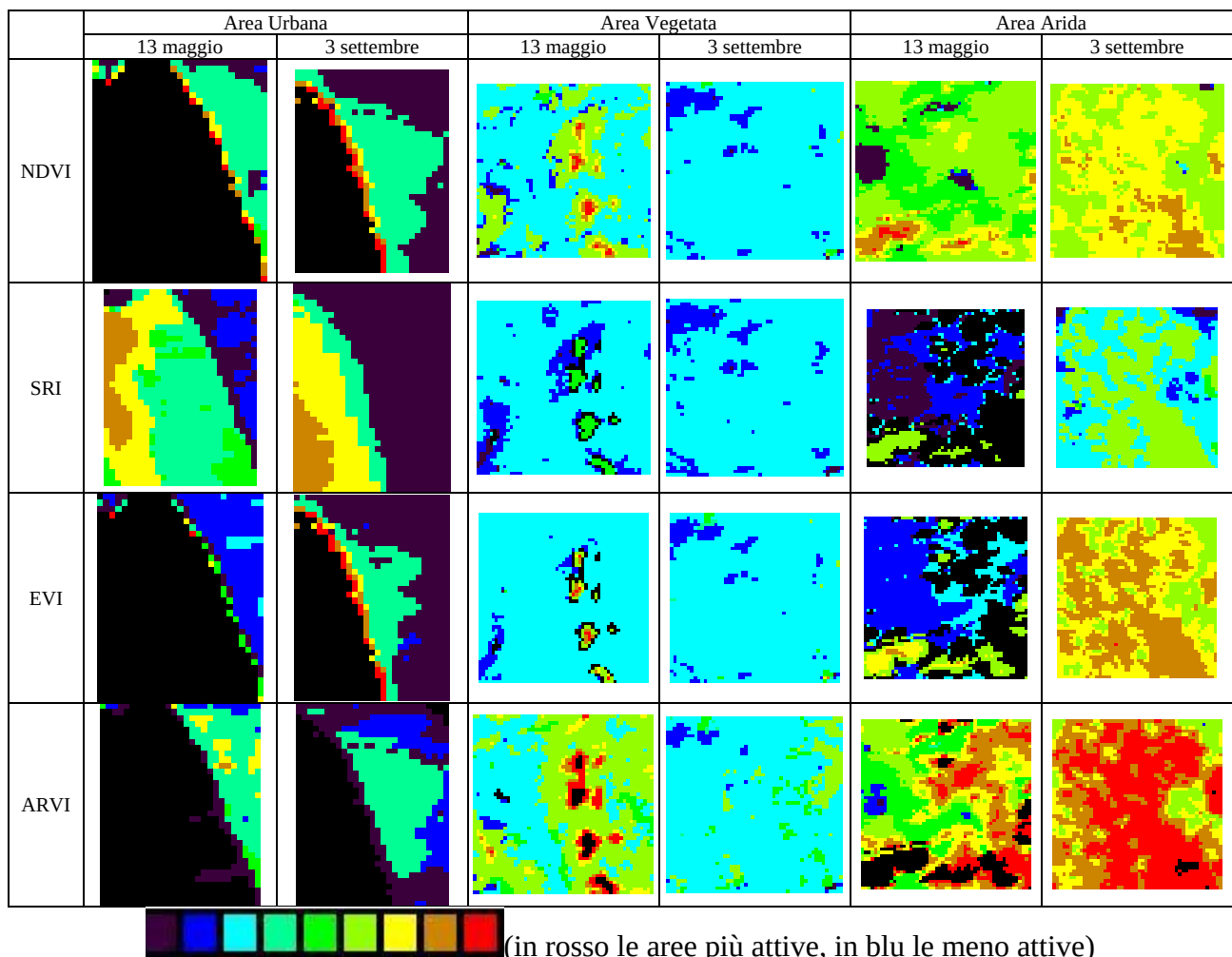


Figura 7 - Carte tematiche indicanti lo stress della vegetazione a Maggio e a Settembre

Conclusioni

Le immagini provenienti dal sensore multispettrale MODIS, che vengono acquisite dall'antenna dell'Università di Salerno in tempo reale, rappresentano una grande mole di dati i quali, se opportunamente elaborati, consentono un monitoraggio continuo del territorio e possono essere

utilizzati dagli Enti locali al fine di individuare quali macro aree abbiano bisogno di interventi specifici.

Nel caso in esame riguardante lo studio della flora, è possibile sfruttare la combinazione delle diverse bande spettrali al fine di ottenere Indici di Vegetazione quali NDVI, SRI, EVI e ARVI che hanno mostrato una buona sensibilità nello stimare e monitorare variazioni spaziali e temporali della vegetazione. In particolare, è emerso che il *range* di sensibilità dei diversi indici è leggermente diverso a seconda delle condizioni e della tipologia di terreno che si prende in esame. Ad esempio, EVI e ARVI, risultando meno sensibili a problemi quali la saturazione, forniscono migliori risultati in aree altamente vegetate e risentono meno anche della presenza del vapor d'acqua e dell'aerosol in sospensione. Tutti e quattro gli indici si sono però comportati in modo pressoché equivalente in aree miste per le quali il *range* di variazione è praticamente confrontabile.

Con riferimento alle variazioni temporali, si nota invece che SRI, anche per la maggiore variabilità consentitagli dal *range* di intervallo operativo, è l'indicatore che meglio di altri evidenzia le sostanziali differenze intercorse nell'arco dei quattro mesi presi in esame.

Per quanto riguarda i rimanenti indici, la loro possibilità di utilizzo nello stimare e valutare le variazioni spatio-temporali della vegetazione è abbastanza modesta ma sono comunque molto utili per studiare e individuare le aree vegetate sottoposte a maggior stress. Come mostrato nelle carte tematiche prodotte, gli indici, oltre a fornire informazioni dirette sullo stato della vegetazione, se opportunamente combinati, permettono infatti di ricavare informazioni aggiuntive riguardanti lo stato di salute e la resa della vegetazione sia di alto fusto che di coltura. Naturalmente tali informazioni sono principalmente di carattere qualitativo e non quantitativo e possono essere un utile strumento di supporto e non sostituire, almeno per ora, le tradizionali tecniche di monitoraggio e controllo che restano l'unico metodo per appurare le sostanziali condizioni della vegetazione.

Bibliografia

- Asner G.P. (1998), "Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance", *Remote Sensing of Environment*, 64:33, 234-253, Elsevier Science.
- Buheaosier K. et al. (2003), "Comparison of Image Data Acquired with AVHRR, MODIS, ETM+ and ASTER over Hokkaido", Japan, *Adv. Space Res*, Vol.32 11:2211-2216.
- Gallo K. et al. (2005), "Multi-platform comparisons of MODIS and AVHRR normalized difference vegetation index data", *Remote Sens. Environ.*, 99: 221 – 231.
- Gumley L., Descloitres J., Schmaltz J. (2003), "Creating Reprojected True Color MODIS Images: A Tutorial", *Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison*, Version 1.0.
- Greg H. et al. (1999), "OPERATIONS CONCEPT DOCUMENT Version 2.1 MCST Document #", *NASA/Goddard Space Flight Center*.
- Haggerty P., Sprietz K. (2003), "Processing Terra and Aqua MODIS with NANOOK, the NOAA/NESDIS Near-real-time system", *19th Conference on IIPS* 11.5.
- IMAPPv1.5R1 User's Manual -http://eostation.scanex.ru/download/software/imappw_um.htm
- James M.E., Kalluri S.N.V. (1994), "The parhfinder AVHRR land data set: an improved coarse resolution data set for terrestrial monitoring", *International Journal of Remote Sensing*, 15.
- SDPS (2004), "MODIS Science Data Processing Software Version 1-2-3 System Description; SDPS Version 4.0 System Description.", *SDST-119B. May 2004*, 3-17.
- Nagler P.L. et al. (2001), "Assessment of spectral vegetation indices for riparian vegetation in the Colorado River delta, Mexico", *Journal of Arid Environments*, 49:91-110.
- Strabala, K. I. et al. (2002), "MODIS direct broadcast products and applications.", *Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds III, Hangzhou, China, 25-27 October 2002 International Society for Optical Engineering, (SPIE)*, Bellingham, WA, 2003, pp.402-412. Call Number: Reprint # 3476.