

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE
ED IL TERRITORIO**

DICAM

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali

TESI DI LAUREA

in

Telerilevamento – LS

**Analisi multiscala e multitemporale con
immagini telerilevate per la regione della
Siria interna settentrionale**

CANDIDATO

Proietti Gabriele

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Bitelli Gabriele

CORRELATORE

Ing. Mandanici Emanuele

Anno Accademico 2010/11

Sessione II

*“E’ così la vita, mio caro signore,
nessuno sa quel che riserva il domani”.*

José Saramago, L’anno della morte di Ricardo Reis

*“Non si vede che col cuore.
L’essenziale è invisibile agli occhi”.*

Antoine de Saint – Exupery, Il piccolo principe

“La normalità è solo una questione di consenso”.

Paulo Coelho, Veronika decide di morire

Sommario

Introduzione.....	3
1. Il Telerilevamento.....	5
1.1 La radiazione elettromagnetica	5
1.2 Lo spettro elettromagnetico	6
1.3 Principali grandezze radiometriche	10
1.4 Meccanismi di interazione della radiazione elettromagnetica con la materia.....	11
1.4.1 Il fenomeno della riflessione.....	12
1.5 L'effetto atmosferico	13
1.6 I sensori per il Telerilevamento.....	15
1.6.1 Rilevatori elettrici a struttura CCD.....	16
1.7 Le risoluzioni dei sistemi di osservazione	17
2. Le immagini nel Telerilevamento	19
2.1 Caratteri di un'immagine telerilevata	19
2.1.1 Visualizzazione delle immagini telerilevate	22
2.2 La pre – elaborazione delle immagini telerilevate.....	24
2.2.1 La calibrazione radiometrica.....	25
2.2.2 La correzione geometrica.....	30
3. La classificazione delle immagini telerilevate	33
3.1 Tecniche di classificazione pixel – based.....	35
3.1.1 Metodi supervisionati	37
4. Dati e materiali utilizzati.....	39
4.1 Le missioni Landsat	39
4.1.1 Il satellite Landsat 5	40
4.1.2 Il satellite Landsat 7	41
4.2 Il sensore ASTER.....	43
4.3 Il DSM SRTM.....	44

5. Software utilizzati.....	47
6. Principali caratteristiche del sito in esame	49
6.1 Caratteristiche geomorfologiche e principali usi del suolo.....	49
6.2 Caratteristiche tettonico – sismologiche	50
7. Analisi ed elaborazioni effettuate	57
7.1 La calibrazione delle immagini Landsat	58
7.1.1 La calibrazione delle immagini Landsat in ENVI.....	59
7.2 La classificazione di un'immagine Landsat.....	62
7.3. Analisi multitemporale.....	80
7.4 Classificazione di un'immagine ASTER	88
7.5 Il mosaico di immagini telerilevate	100
7.5.1 Il mosaico di immagini in ENVI.....	100
7.6 Linea di calibrazione empirica.....	113
7.6.1 Linea di calibrazione empirica in ENVI	114
7.7 Classificazione del mosaico	125
7.8 Caratterizzazione sismologica dell'area	127
8. Conclusioni	133
9. Bibliografia	135
10. Ringraziamenti.....	137

Introduzione

La Siria interna settentrionale rappresenta un'area di grande interesse dal punto di vista degli studi storico – archeologici. Da decenni, infatti, in questa zona si susseguono molteplici campagne di scavi archeologici e numerosi progetti di ricerca internazionali, che hanno portato alla luce rilevanti e straordinari ritrovamenti e testimonianze inattese.

Tale zona è diventata un'importantissima sede di scavi archeologici da quando una missione italiana, iniziata a partire dal 1964 e diretta da Paolo Matthiae dell'Università “La Sapienza” di Roma, ha fatto emergere la struttura urbana dell'antica città di Ebla: un'ampia cinta muraria a cerchio, fortificata con possenti bastioni grandangolari, dove si aprono quattro grandi porte urbane disposte a croce, con al centro l'Acropoli.

In seguito alla scoperta di Ebla sono stati avviati molteplici programmi di ricerca finalizzati alla ricostruzione ed alla caratterizzazione del paesaggio antico della Siria interna settentrionale.

L'Università di Bologna, con il Dipartimento di Archeologia, è in particolar modo impegnata in attività di ricerca archeologica nei centri di Tell Mardikh (Ebla) e Tell Tuqan, in Siria, e di Tilmen Höyük e Tasli Gecit, in Turchia (regione anatolica sud – orientale). La ricerca viene realizzata con un approccio multidisciplinare che vede impegnati differenti settori scientifici, afferenti a diversi Dipartimenti dell'Ateneo, tra i quali il settore dell'Ingegneria del Rilevamento, che viene interessata con le molteplici tecniche offerte dalla moderna Geomatica (fotogrammetria, telerilevamento, cartografia numerica e GIS, topografia, ecc.). E' proprio all'interno di tale contesto che si inquadra il presente lavoro di tesi, che vuol essere uno strumento di supporto interdisciplinare per le attività e le ricerche sotto differenti e molteplici punti di vista: ingegneristico, archeologico, geologico ed agrario.

L'obiettivo principale di questo elaborato riguarda l'analisi e l'inquadramento del territorio della Siria interna settentrionale, attraverso l'impiego delle immagini satellitari e con il supporto dei dati presenti in letteratura, al fine di produrre una classificazione dell'area di interesse. Per permettere una migliore caratterizzazione del territorio, i risultati ottenuti sono inoltre valutati e comparati utilizzando differenti scale temporali e spaziali.

Tali analisi hanno per loro natura un carattere multitemporale, con l'obiettivo di valutare le principali trasformazioni del territorio, analizzando in particolar modo il processo di urbanizzazione ed il differente utilizzo del suolo verificatisi negli ultimi 20 anni. Le analisi sono inoltre condotte su scale territoriali differenti, permettendo così di creare un database georeferenziato multiscala, che sia di supporto allo studio di questo territorio.

Il lavoro ha comportato la messa a punto di procedure specifiche e l'applicazione di numerosi e diversi metodi propri del Telerilevamento ottico.

A completamento delle elaborazioni di inquadramento del territorio della Siria interna settentrionale, è stato anche realizzato un layer relativo alla sismicità dell'area, che come noto presenta storicamente una forte attività sismica, con l'organizzazione in ambiente GIS dei dati relativi ai principali sistemi di faglia presenti nell'area.

Al fine di raggiungere le finalità sopra riportate, la tesi è strutturata come segue.

Il primo capitolo è dedicato ad una trattazione generale sulla disciplina del Telerilevamento, presentandone le grandezze caratteristiche ed alcuni elementi di base.

Nel secondo capitolo vengono descritte le caratteristiche delle immagini telerilevate ed i differenti trattamenti ai quali vengono sottoposte per estrarne il maggiore contenuto informativo possibile.

Nel terzo capitolo vengono presentate, in generale, le metodologie di classificazione delle immagini telerilevate, analizzando con particolare dettaglio le tipologie e le tecniche utilizzate nel seguito delle elaborazioni.

Nel quarto capitolo vengono illustrate le principali caratteristiche dei sensori satellitari dai quali sono state ricavate le immagini utilizzate, e gli aspetti basilari dei dati impiegati.

Nel quinto capitolo vengono brevemente presentati i software adoperati nell'ambito della successiva fase di sperimentazione.

Nel sesto capitolo viene descritta la regione in analisi, definendola sotto le diverse tematiche d'interesse ai fini delle elaborazioni successive, così da eseguire una preliminare caratterizzazione dell'area. Viene presentato un inquadramento della regione basato sui dati conosciuti e finalizzato all'individuazione di elementi utili alle procedure di classificazione delle immagini.

Nel settimo capitolo vengono illustrate le differenti analisi ed elaborazioni e le procedure seguite per raggiungere gli obiettivi prefissati riportando i principali risultati ottenuti, che sono esaminati qualitativamente, e laddove possibile anche quantitativamente, così da fornire una valutazione della loro accuratezza.

L'ultimo capitolo è dedicato ad alcune considerazioni conclusive sull'esperienza condotta.

1. Il Telerilevamento

Il Telerilevamento, chiamato in letteratura anglosassone Remote Sensing, è la disciplina tecnico – scientifica che permette di ricavare informazioni sull'ambiente e su oggetti posti a distanza, mediante misure di radiazione elettromagnetica emessa, riflessa o trasmessa dalle superfici in esame. Misurare l'energia elettromagnetica significa quantificare le alterazioni che la superficie impone alla radiazione, ovvero alle sue caratteristiche di intensità, frequenza e polarizzazione; tale processo si traduce nella conoscenza fisica dell'oggetto in studio.

Le misurazioni della radiazione elettromagnetica, che interagisce con le superfici fisiche d'interesse, vengono fornite sotto forma di immagini, risultanti dall'elaborazione di dati numerici e sono rilevate da appositi sensori remoti. Tali dispositivi, collocati su diverse tipologie di piattaforme quali aerei, satelliti o sonde spaziali, permettono di rilevare l'energia elettromagnetica proveniente dalla scena in esame e di convertirla in valori numerici positivi.

Il Telerilevamento è quindi una scienza applicata con finalità diagnostico – investigative che permette di identificare, misurare ed analizzare le caratteristiche qualitative e quantitative di un determinato oggetto, area o fenomeno, senza entrarne in contatto diretto, offrendo un'informazione globale sull'ambiente e sul territorio.

1.1 La radiazione elettromagnetica

L'osservabile misurato nel Telerilevamento, ossia il veicolo d'informazione, è l'energia elettromagnetica, che rappresenta il collegamento tra il sensore remoto ed il fenomeno in esame; le variazioni nelle caratteristiche della radiazione elettromagnetica diventano fonte di una grande quantità di dati, che consentono di interpretare e di ricavare importanti informazioni sui diversi aspetti del fenomeno investigato.

Il trasferimento dell'energia elettromagnetica si manifesta con le proprietà sia di un'onda sia di corpuscoli elementari.

Sulla base della teoria ondulatoria, l'energia radiante può essere descritta come un'onda armonica che si propaga nello spazio ed è costituita da due campi di forza fra loro ortogonali: quello elettrico E, la cui ampiezza varia con continuità secondo la direzione di propagazione dell'onda elettromagnetica, e quello magnetico M.

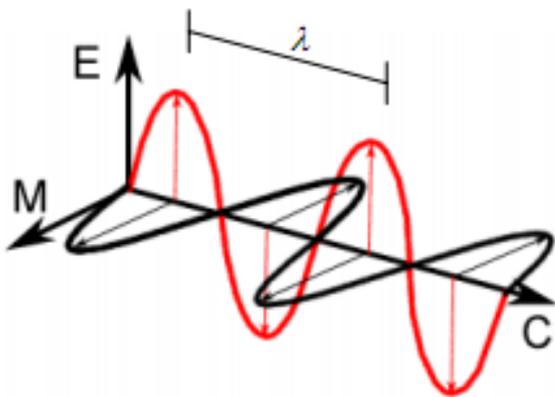


Figura 1. Schematizzazione della propagazione di un'onda elettromagnetica

La velocità di propagazione dell'onda è costante e pari al prodotto fra la lunghezza d'onda λ e la frequenza ν e vale circa: $c = 300.000 \text{ km/s}^{-1}$; pertanto, entrambi i campi E e M viaggiano anch'essi alla velocità c , nota come velocità della luce.

Inoltre, sulla base della teoria corpuscolare, secondo l'ipotesi quantistica di Planck, l'energia elettromagnetica non è distribuita uniformemente lungo lo spettro, ma si propaga per quantità finite, dette fotoni o quanti d'energia, particelle d'energia senza massa che viaggiano alla velocità della luce. L'energia trasportata da un fotone è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda: maggiore è la lunghezza d'onda e minore è il suo contenuto energetico.

1.2 Lo spettro elettromagnetico

Lo spettro elettromagnetico rappresenta la distribuzione continua dell'energia elettromagnetica ordinata per lunghezze d'onda λ crescenti, con origine verso lunghezze d'onda piccolissime. Anche se la realtà fisica dello spettro elettromagnetico è un continuum d'energia, per ragioni pratiche ed operative lo si considera suddiviso in diversi intervalli detti bande spettrali.

Le bande spettrali, ossia le lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica utilizzabili in Telerilevamento ai fini dell'esecuzione delle misure della radiazione elettromagnetica, sono comprese all'interno delle finestre atmosferiche, che corrispondono alle porzioni dello spettro in cui l'atmosfera è trasparente per la particolare lunghezza d'onda considerata. Per questo motivo non esiste continuità fra le bande spettrali, essendo appunto collocate nelle finestre atmosferiche, ossia nelle zone di particolare trasparenza dell'atmosfera, evitando opportunamente le bande ove l'atmosfera risulta invece opaca.

Tenendo quindi in considerazione la distribuzione dell'energia in funzione della lunghezza d'onda, i diversi meccanismi di interazione con la materia e le caratteristiche di trasparenza atmosferica, lo spettro utile per i sistemi di Telerilevamento può essere concettualmente diviso in due finestre principali: la finestra ottica e la finestra radar.

La finestra ottica è compresa fra i 100 nm ed i 20 μm di lunghezza d'onda e l'energia studiata è quella riflessa od emessa in forma naturale dalle superfici. A livello pratico – operativo la finestra dell'ottico è costituita da tre bande principali, ognuna delle quali è suddivisa in diverse sottobande.

<i>Banda</i>	<i>Banda</i>	<i>Intervallo λ</i>	<i>Ampiezza $\Delta\lambda$</i>	<i>Intervallo ν</i>
Ultravioletto UV	Ultravioletto	100 – 380 nm	280 nm	3000 – 789 THz
Visibile VIS	Violetto	380 – 430 nm	50 nm	789 – 697 THz
	Blu	430 – 475 nm	45 nm	697 – 631 THz
	Blu-verde	475 – 490 nm	15 nm	631 – 612 THz
	Verde	490 – 550 nm	60 nm	612 – 545 THz
	Giallo	550 – 580 nm	30 nm	545 – 517 THz
	Arancio	580 – 620 nm	40 nm	517 – 484 THz
	Rosso	620 – 750 nm	130 nm	484 – 400 THz
Infrarosso IR	IR vicino NIR	0.75 – 0.9 μm	0.15 μm	400 – 333 THz
		0.9 – 1.3 μm	0.40 μm	333 – 231 THz
	IR onde corte SWIR	1.5 – 2.5 μm	1.00 μm	200 – 120 THz
	IR onde medie MWIR	3.5 – 5.2 μm	1.70 μm	86 – 58 THz
IR termico TIR	7.0 – 20 μm	13 μm	43 – 15 THz	

Figura 2. Principali bande e relative sottobande della finestra ottica

Dal punto di vista dell'energia interessata, è possibile distinguere nella finestra ottica due parti differenti.

- Da 0.38 μm a 3 μm : rappresenta la zona dello spettro più adatta alle indagini sul comportamento spettrale delle superfici utilizzando l'energia solare riflessa; i coefficienti più importanti e critici in questa parte dello spettro sono la riflettività spettrale ρ_λ e la trasmittività spettrale τ_λ , definiti in seguito.
- Da 3 μm a 20 μm : sono preponderanti gli effetti dell'energia emessa spontaneamente dalle superfici poste a temperatura ambiente, cioè intorno ai 300 K; è il dominio del coefficiente di emissività spettrale ε_λ che condiziona fortemente l'interpretazione dei dati in termini di temperatura superficiale, poiché permette di passare dal dato misurato all'effettiva temperatura delle diverse superfici.

Il coefficiente di emissività ϵ esprime la maggiore o minore attitudine con cui una data superficie emette energia elettromagnetica e descrive quanto il comportamento di un corpo si allontana dal modello ideale di corpo nero.

Qualsiasi superficie naturale, avente una temperatura superiore allo zero assoluto (0 K pari a circa -273° C), infatti, emette radiazioni elettromagnetiche lungo tutto lo spettro che variano in funzione della temperatura e della natura del corpo stesso, regolata dal coefficiente di emissività spettrale ϵ_λ , mostrando un valore di emissività che dipende dalla particolare lunghezza d'onda considerata. In particolare, all'aumentare della temperatura di un corpo diminuisce la lunghezza d'onda in corrispondenza della quale l'emissione elettromagnetica è massima.

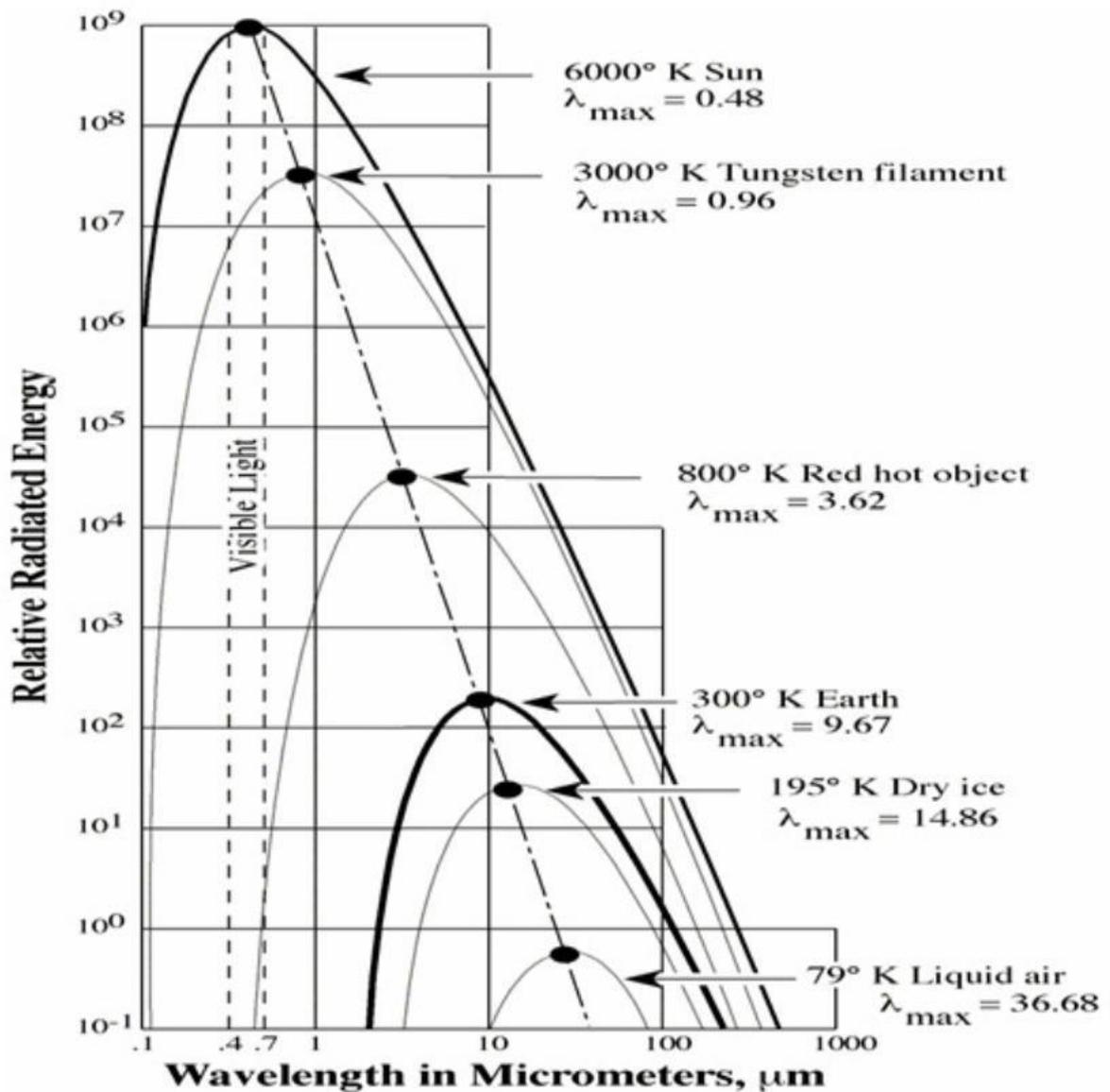


Figura 3. Radiazione emessa dalle varie superfici in funzione di temperatura e lunghezza d'onda

La finestra radar è compresa fra 1mm ed 1m di lunghezza d'onda e l'energia studiata è quella attivata e quindi ricevuta, in maniera artificiale, attraverso un'apposita antenna.

Da quanto detto finora, si evince non solo che ogni regione dello spettro elettromagnetico ricopre un ruolo importante nella caratterizzazione delle proprietà delle superfici, ma anche che la metodologia utilizzata dipende dal dominio della lunghezza d'onda della radiazione. In particolare:

- l'ultravioletto, il visibile ed il vicino infrarosso utilizzano la riflettanza spettrale ed il sensore a bordo di un satellite, o di un velivolo in generale, misura lo spettro di energia riflessa dalla scena in esame
- l'infrarosso termico utilizza l'energia emessa dalla Terra ed il sensore rileva direttamente l'emissione naturale degli oggetti situati sulla superficie terrestre
- le microonde si appoggiano sia sull'energia naturalmente emessa dalla superficie terrestre sia su quella riflessa ed in origine prodotta da uno strumento artificiale; un radar emette la radiazione elettromagnetica e quindi un sensore rileva la frazione di questa che viene riflessa dagli oggetti posti sulla superficie terrestre.

Di conseguenza, la scelta delle lunghezze d'onda utilizzabili è limitata a particolari domini quali: il visibile ($\lambda = 0.4 \div 0.7\mu\text{m}$), il vicino infrarosso ($\lambda = 0.7 \div 1.3\mu\text{m}$; $1.5 \div 1.8\mu\text{m}$; $2 \div 2.5\mu\text{m}$), l'infrarosso medio ($\lambda = 3 \div 5\mu\text{m}$), l'infrarosso termico ($\lambda = 8 \div 14\mu\text{m}$) ed il dominio delle microonde ($\lambda = 1\text{mm} \div 1\text{m}$). Questi domini rappresentano, infatti, le finestre di trasparenza dell'atmosfera terrestre alle radiazioni elettromagnetiche.

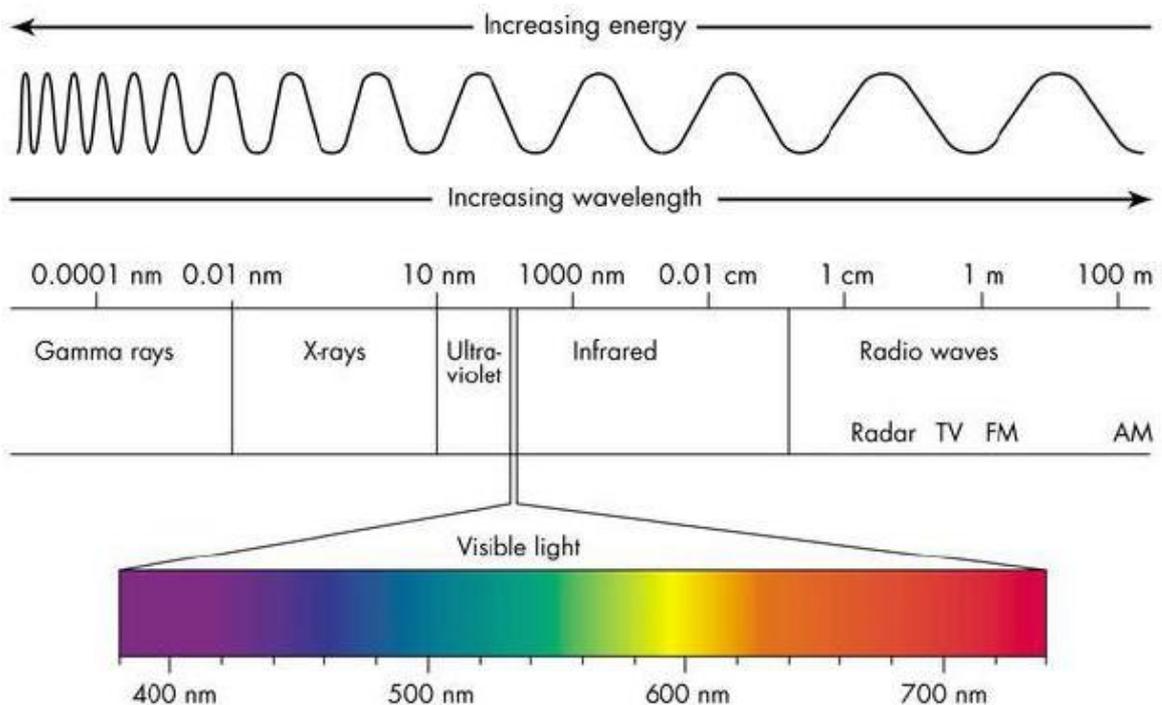


Figura 4. Lo spettro elettromagnetico

1.3 Principali grandezze radiometriche

Con il termine grandezze radiometriche si indicano quelle grandezze fisiche relative alla radiazione elettromagnetica. Le misure della radiazione elettromagnetica emessa, riflessa o trasmessa, eseguite dai sensori per il Telerilevamento, dipendono essenzialmente da quattro fattori:

1. il tempo di integrazione del sensore Δt
2. l'area osservata dal sensore dA
3. l'angolo solido $\Delta\omega$ entro il quale il sensore raccoglie la radiazione elettromagnetica, detto anche apertura del sensore
4. la banda spettrale del sensore $\Delta\lambda$, ossia l'intervallo spettrale indagato dal sensore stesso.

Tutte le grandezze radiometriche, infatti, possono anche essere messe in relazione ad una particolare lunghezza d'onda, valutando cioè il loro comportamento, lunghezza d'onda per lunghezza d'onda, assumendo così un significato spettrale.

Le grandezze più importanti nel campo del Telerilevamento, sono:

- ✓ l'energia radiante, Q : rappresenta l'energia elettromagnetica trasportata dall'onda
- ✓ il flusso radiante o potenza, Φ : rappresenta la quantità d'energia radiante trasferita nell'unità di tempo da una superficie all'altra
- ✓ la radianza, L : valore del flusso radiante emesso da una sorgente estesa per unità di angolo solido e di superficie secondo una certa direzione, misurata su un piano normale alla direzione considerata.

In particolare, la radianza rappresenta la grandezza fondamentale in Telerilevamento ed è particolarmente utile per quantificare la quantità di luce emessa o riflessa da una sorgente che viene ricevuta da un dato sistema ottico rivolto verso la sorgente stessa e caratterizzato da un determinato diametro angolare; naturalmente, in questo caso, l'angolo solido considerato equivale all'apertura del sistema ottico. Tale concetto è quindi legato sia alla geometria dell'osservazione e sia alle caratteristiche strumentali e permette di descrivere come la radiazione si distribuisce nello spazio.

La radianza è matematicamente definita dalla seguente relazione:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA d\Omega \cos \theta} \simeq \frac{\Phi}{\Omega A \cos \theta}$$

dove:

L è la radianza ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$);

Φ è la potenza (W);

θ è l'angolo compreso tra la normale alla superficie e la direzione specificata;

A è la superficie emittente (m^2);

Ω è l'angolo solido (sr).

1.4 Meccanismi di interazione della radiazione elettromagnetica con la materia

Quando la radiazione elettromagnetica colpisce una superficie qualsiasi sono possibili tre meccanismi di interazione: riflessione, assorbimento, trasmissione. Una parte del flusso radiante incidente Φ_i viene riflessa Φ_r , una parte viene assorbita Φ_a , ed infine la restante viene trasmessa Φ_t . Per il principio di conservazione dell'energia, quindi, si avrà: $\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t$.

Considerando i rapporti dei tre flussi radianti, rispetto al flusso radiante incidente, si ottengono i tre coefficienti seguenti:

- coefficiente di riflessione o riflettività, $\rho = \Phi_r / \Phi_i$
- coefficiente di assorbimento o assorbività, $\alpha = \Phi_a / \Phi_i$
- coefficiente di trasmissione o trasmissività, $\tau = \Phi_t / \Phi_i$

I valori assunti da tali coefficienti dipendono fondamentalmente dalla lunghezza d'onda presa in considerazione, variando anche in funzione della natura chimico – fisica e delle caratteristiche di rugosità della superficie in esame. Infatti, le proporzioni fra energia riflessa, assorbita e trasmessa, variano a seconda della tipologia di materiale che costituisce la superficie: a parità di superficie, poi, le quantità di energia riflessa, assorbita e trasmessa, variano in funzione della lunghezza d'onda. Ciò implica che due superfici possono risultare indistinguibili dal punto di vista spettrale in una certa lunghezza d'onda e perfettamente discriminabili in un'altra.

L'intero processo di interazione con la materia ubbidisce al principio della conservazione dell'energia espresso dalla legge di Kirchhoff, per la quale: $\rho + \alpha + \tau = 1$, dove ρ , α , τ sono rispettivamente i coefficienti di riflessione, assorbimento e trasmissione che rappresentano le frazioni di energia riflessa, assorbita e trasmessa rispetto a quella incidente. L'energia assorbita α serve a “caricare” termicamente il corpo interessato per poi innescare il fenomeno dell'emissione di energia elettromagnetica, regolata a sua volta dal coefficiente di emissione ϵ .

Ogni oggetto è caratterizzato da una propria capacità di riflessione, assorbimento e trasmissione delle onde elettromagnetiche che ne permette la caratterizzazione. La gran parte delle superfici, per ampie regioni dello spettro elettromagnetico, risulta opaca o comunque caratterizzata da valori di trasmissività τ pressoché trascurabili. In condizioni di corpo opaco è possibile ridurre la relazione espressa dalla legge di Kirchhoff alle due sole componenti di riflessione ed assorbimento, ottenendo quindi: $\rho + \alpha = 1$; applicando a queste superfici il principio per cui un buon assorbitore è anche un buon emettitore, la relazione precedente può essere così riscritta: $\rho + \varepsilon = 1$.

Per le superfici reali, a causa della forte dipendenza e variabilità dei valori assunti dai loro coefficienti in funzione della lunghezza d'onda considerata, l'equazione generale diventa: $\rho_\lambda + \varepsilon_\lambda = 1$; pertanto, il flusso radiante proveniente da una generica superficie include sostanzialmente il contributo delle sole due seguenti componenti di energia: riflessa ed emessa.

1.4.1 Il fenomeno della riflessione

La maggior parte dei sistemi di Telerilevamento opera nelle regioni dello spettro elettromagnetico in cui le lunghezze d'onda sono principalmente riflesse e quindi le proprietà di riflessione delle superfici sono di grande interesse. Le modalità con cui una superficie riflette dipendono dalla interazione di due fattori: scabrezza della superficie e lunghezza d'onda della radiazione incidente.

Uno dei parametri più importanti e più frequentemente misurati in Telerilevamento è quindi la riflettività ρ , che permette di definire la firma spettrale di una superficie, potendo così identificarla. La firma spettrale, o curva di riflettanza spettrale, fornisce la misura della capacità di una determinata superficie di riflettere l'energia incidente alle varie lunghezze d'onda e può essere matematicamente espressa attraverso la seguente relazione:

$$\rho_\lambda \% = \frac{\Phi_{r\lambda}}{\Phi_{i\lambda}} \cdot 100$$

Le misure di riflettività interessano, in genere, la regione dello spettro compresa fra l'ultravioletto e l'infrarosso; la curva di riflettanza descrive quindi l'andamento della riflettività per una data superficie nell'intervallo spettrale $\lambda = 0.4 \div 2.5\mu\text{m}$.

La curva di riflettanza di una superficie varia molto in funzione delle condizioni ambientali (periodo dell'anno, condizione fisica e chimica della superficie) e di ripresa (geometria Sole – superficie – sensore). E' particolarmente utile, però, disegnare delle curve di riflettanza media che, pur avendo soltanto un valore indicativo in quanto soggette alle variazioni sopra descritte, possono fornire delle informazioni importanti sul comportamento delle superfici in esame.

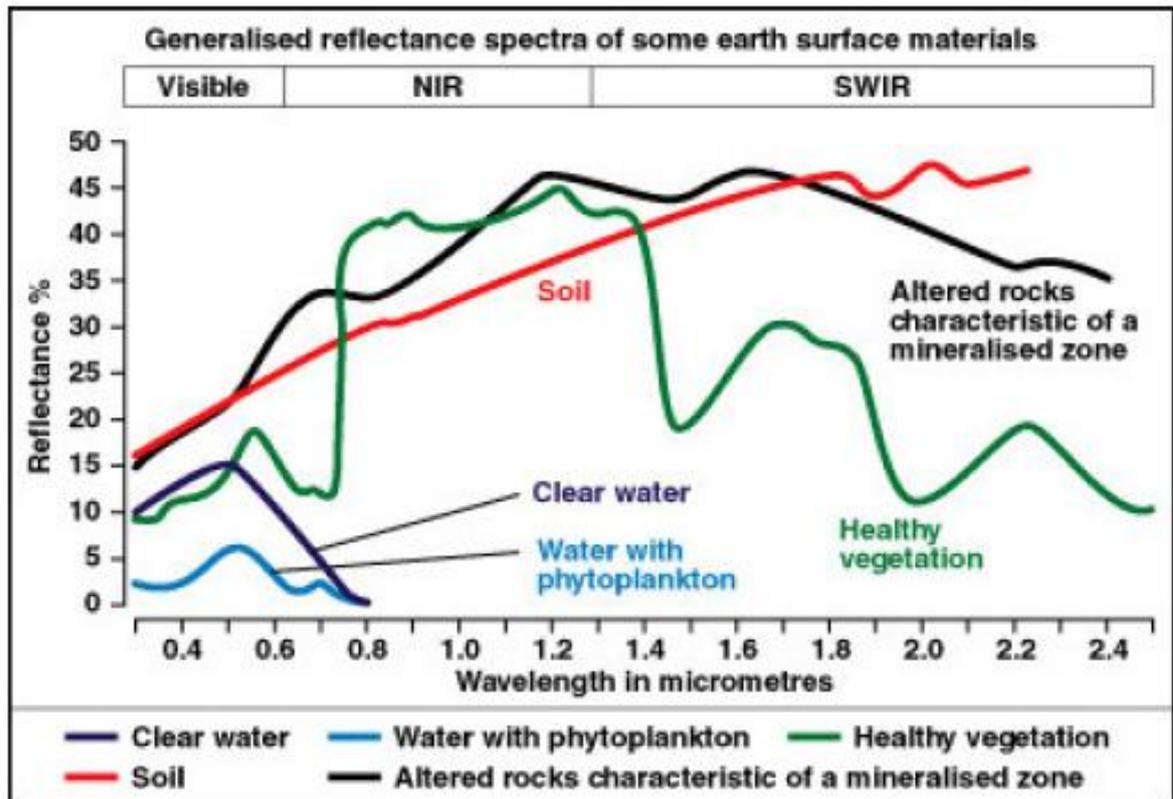


Figura 5. Firme spettrali delle principali superfici naturali: è riportato l'andamento della riflettanza al variare della lunghezza d'onda, calcolata come specificato nell'equazione precedentemente riportata.

1.5 L'effetto atmosferico

Oltre agli oggetti situati sulla superficie terrestre, anche l'atmosfera può assorbire, riflettere o trasmettere in modo diverso nello spazio e nel tempo la radiazione elettromagnetica, comportandosi come un disturbo quando non rappresenta l'oggetto di studio della rilevazione. Nel suo percorso dal bersaglio al sensore, infatti, l'energia elettromagnetica viene interessata da fenomeni legati alla presenza nell'atmosfera di particelle, solide e liquide, gas ed aerosol, che causano il cosiddetto effetto atmosferico, alterando, ed in particolare diminuendo, il valore di radianza originario.

Solar Radiation Spectrum

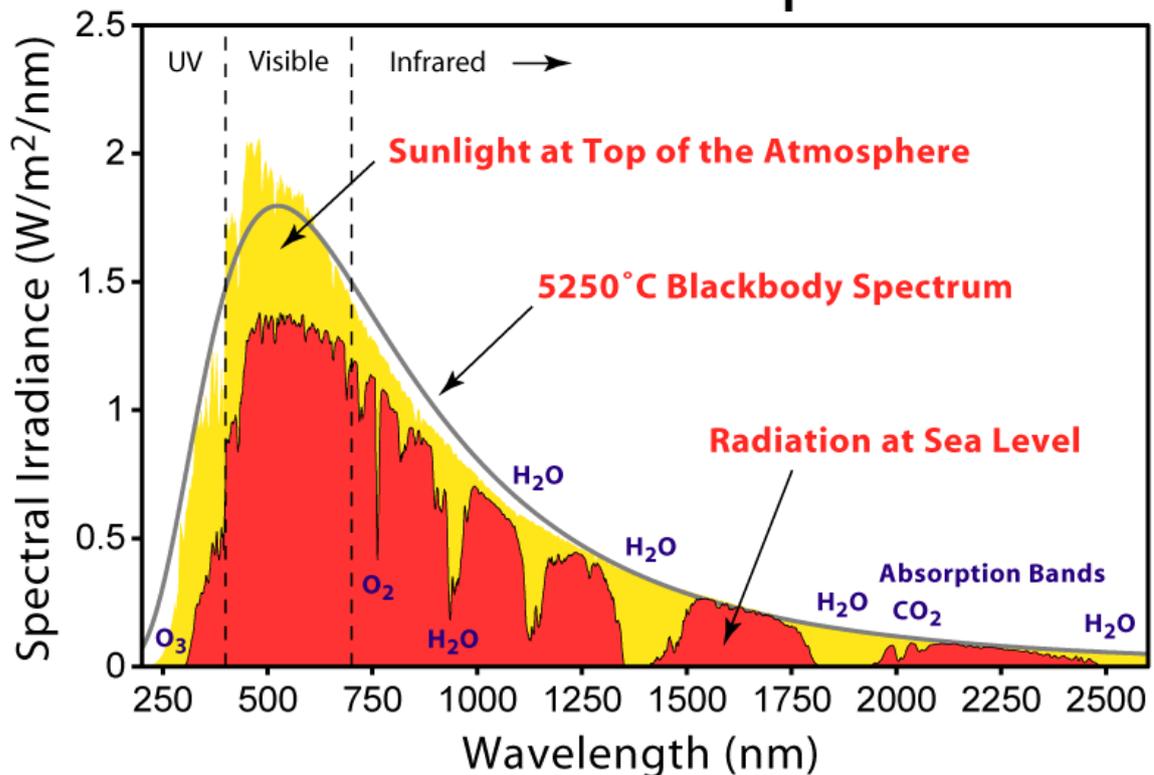


Figura 6. Diminuzione della radiazione elettromagnetica solare a causa dell'effetto atmosferico

L'interazione fra la radiazione elettromagnetica e l'atmosfera si compone di due meccanismi principali che agiscono sulla radiazione solare:

- l'assorbimento, che riduce la quantità d'energia che arriva sulla Terra trasformandola in calore, che a sua volta innesca il processo di emissione;
- la diffusione o scattering, che ridistribuisce l'energia radiante nello spazio, cambiandone semplicemente la direzione di propagazione.

L'effetto globale di questi due fenomeni è quello di ridurre il flusso radiante incidente, producendo una diminuzione complessiva della trasparenza atmosferica.

Il fenomeno dell'assorbimento, in particolare, agisce come un filtro selettivo rendendo l'atmosfera opaca, presentando cioè bassissimi valori di trasmissività τ , in determinati intervalli dello spettro elettromagnetico.

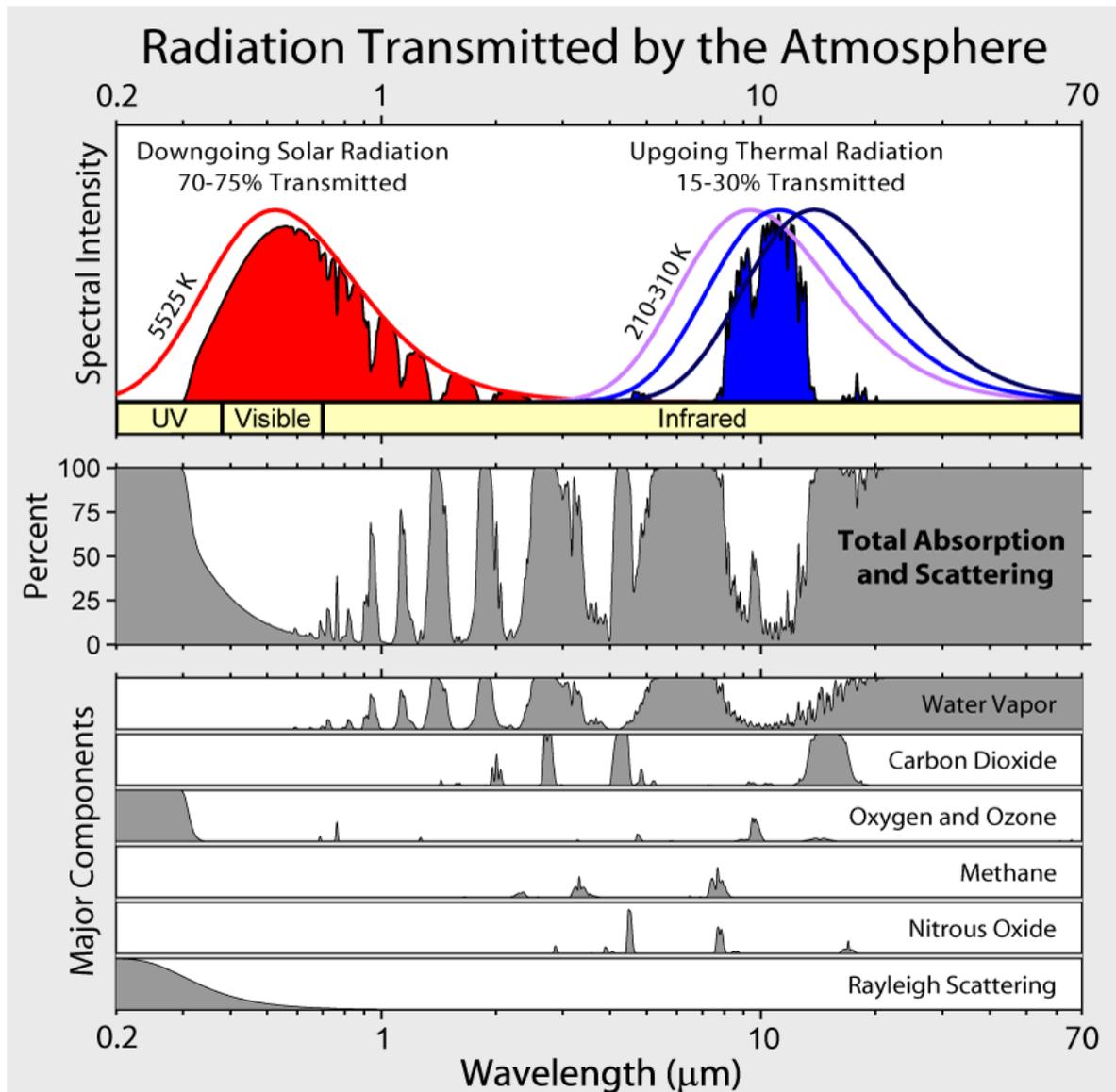


Figura 7. Le due componenti dell'effetto atmosferico: assorbimento e scattering

1.6 I sensori per il Telerilevamento

Con il termine sensore si intende un dispositivo elettronico in grado di rilevare l'energia elettromagnetica proveniente da una scena e di convertirla in informazione, registrandola e memorizzandola sotto forma di segnale elettrico.

Una prima e fondamentale classificazione nell'ambito delle differenti modalità di Telerilevamento può essere fatta in base alle funzionalità del sensore utilizzato per la misura della radiazione elettromagnetica. Si distinguono, pertanto, le due seguenti tipologie di Telerilevamento:

1. Telerilevamento passivo: il sensore è deputato al solo ricevimento della radiazione elettromagnetica emessa o riflessa dall'oggetto che si sta analizzando

2. Telerilevamento attivo: il sensore emette la radiazione elettromagnetica e ne rileva, quindi, anche la frazione che viene riflessa dagli oggetti posti sulla superficie terrestre.

Sulla base di questa distinzione è analogamente possibile classificare i sensori per il Telerilevamento in attivi e passivi.

I sensori passivi, sono strumenti che rilevano la radiazione elettromagnetica riflessa, od emessa naturalmente, dagli oggetti in esame situati sulla superficie terrestre utilizzando fonti naturali, come, ad esempio, il Sole. I sistemi per il Telerilevamento passivo sono di due categorie:

- i sensori che operano nel visibile e nell'infrarosso vicino e medio, i quali raccolgono la radiazione elettromagnetica emessa dal Sole e riflessa dalla superficie terrestre,
- i sensori che operano principalmente nell'infrarosso termico, i quali raccolgono le radiazioni emesse direttamente dalla superficie terrestre.

La misura dell'energia riflessa può avvenire solo quando il Sole illumina l'oggetto in osservazione e pertanto non di notte; la rilevazione dell'energia emessa, come nel caso dei sensori operanti nell'infrarosso termico, può essere invece effettuata sia di giorno che di notte.

I sensori attivi, invece, rilevano la radiazione elettromagnetica riflessa da un oggetto irradiato da una fonte di energia generata artificialmente da loro stessi. La radiazione emessa raggiunge l'oggetto in osservazione e la sua frazione riflessa viene rilevata e misurata dal sensore, a seguito dell'interazione con la superficie.

I sistemi per il telerilevamento attivo si dividono in sistemi a scattering, quali il lidar, che operano nel visibile e nell'infrarosso, ed in sistemi radar che operano nel range delle microonde.

Tra i principali vantaggi offerti dai sensori attivi vi è la possibilità di effettuare misure ad ogni ora del giorno e della notte e, nel caso dei radar, anche in ogni condizione meteorologica.

1.6.1 Rilevatori elettrici a struttura CCD

Nella progettazione dei sensori per l'acquisizione di immagini, la tecnologia più affermata prevede l'impiego di un apposito sistema detto CCD (Charge Coupled Device) o dispositivo ad accoppiamento di carica. Tale sistema prevede l'impiego di rilevatori strutturati in modo tale che ognuno di essi accumuli una carica elettrica proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica incidente, che viene poi scaricata e tradotta in segnale elettrico.

Ogni singolo CCD si comporta come se fosse un condensatore nel quale i fotoni incidenti su un'armatura producono una carica elettrica nell'armatura sottostante: questa carica viene letta e trasferita sotto forma di segnale analogico ad un circuito elettrico e costituisce la misura della quantità di luce, o di fotoni, entrata nel dispositivo. Questi elementi rispondono in maniera lineare all'energia che li colpisce, ossia alla radiazione proveniente dalla scena osservata: la carica prodotta, cioè il

numero di elettroni liberati dal rilevatore CCD, è linearmente proporzionale all'intensità della luce incidente.

La serie di impulsi è trasferita al circuito in maniera sequenziale mediante l'ausilio di un registro di posizione ed il segnale viene quindi tradotto e registrato in forma digitale, ricomponendo l'immagine proiettata sulla superficie del CCD stesso. Il segnale in formato analogico viene inviato ad un dispositivo A/D (Analogic to Digital Converter) in grado di convertire una carica elettrica in una tensione, cioè in un numero ad essa proporzionale. Si ottengono così una serie di valori discreti, i Digital Number (DN), che vengono memorizzati in forma digitale su appositi supporti di memoria.

I rilevatori di tipo CCD sono impiegati sia come sensori lineari sia come sensori a matrice, suddivisi in tanti elementi quadrati: i pixel.

La funzione del sensore è pertanto quella di catturare l'energia che colpisce gli elementi fotosensibili dei pixel del rilevatore e di trasformare questa energia in valori numerici discreti, memorizzando quindi l'immagine in formato numerico.

1.7 Le risoluzioni dei sistemi di osservazione

Le specifiche di risoluzione dei dati telerilevati sono tra le caratteristiche più importanti dei sistemi di osservazione, in quanto legate alla capacità di descrivere la scena rilevata in termini di:

- a. dettaglio geometrico o spaziale,
 - b. contenuto spettrale,
 - c. sensibilità radiometrica dei rilevatori,
 - d. frequenza temporale o ripetitività del rilievo.
-
- a. La risoluzione geometrica quantifica il livello dei dettagli riconoscibili al suolo ed esprime il dettaglio raggiungibile da un certo sistema di ripresa. Tale concetto è relativo alle dimensioni degli oggetti rilevabili in una scena e può essere quindi intesa come la dimensione dell'elemento più piccolo distinguibile a terra.
Operativamente, la risoluzione geometrica viene espressa come la dimensione coperta al suolo da ogni singolo pixel ed è legata quindi alla capacità di discriminare in modo distinto due oggetti contigui.
 - b. La risoluzione spettrale è legata alla capacità del sistema di ripresa che viene utilizzato di rilevare la radiazione elettromagnetica su diverse porzioni dello spettro elettromagnetico, permettendo così di ottenere immagini multispettrali. La radiazione raccolta dal sistema di ripresa viene scomposta attraverso un sistema di prismi in diverse componenti spettrali, ognuna delle quali colpisce un determinato rilevatore, permettendo di eseguire contemporaneamente più misure in diverse bande

spettrali; della medesima scena osservata si ottengono quindi più immagini, una per ogni banda spettrale investigata. L'analisi multispettrale migliora la riconoscibilità fisica delle superfici oggetto di studio e la capacità di distinguerle.

- c. La risoluzione radiometrica rappresenta la sensibilità della misura, ovvero la variazione minima nella misura che il sistema riesce a rilevare. E' legata al processo di discretizzazione del dato radiometrico, ossia al numero dei livelli con cui viene quantizzato il segnale nella conversione da analogico a digitale; tali livelli discreti rappresentano i livelli di grigio assegnati ai pixel, noti con il nome di Digital Number (DN).

Operativamente, quindi, la risoluzione radiometrica esprime il numero di livelli di grigio impiegati nella rappresentazione della scena osservata: maggiore è il numero dei livelli di discretizzazione, migliore sarà la risoluzione radiometrica, la capacità descrittiva del sistema di acquisizione e quindi anche la capacità di estrarre informazioni dalla scena.

I sensori operanti sulle più comuni piattaforme satellitari del passato presentavano una risoluzione radiometrica di 8 bit (ossia 1 byte), cui corrispondono 256 livelli per la rappresentazione dei DN; i sensori più moderni hanno frequentemente risoluzioni più elevate, in genere a 12 bit.

- d. La risoluzione temporale è la frequenza con la quale il sensore passa sulla stessa area con la possibilità di ripetere le osservazioni a cadenze temporali costanti o programmabili.

Ad oggi non è ancora possibile avere contemporaneamente le massime prestazioni per ogni tipologia di risoluzione; scegliere un'alta risoluzione geometrica o spettrale costringe ad una bassa risoluzione temporale, invece richiedere un'alta risoluzione radiometrica implica una scarsa risoluzione geometrica e spettrale. In genere è buona norma cercare un compromesso tra risoluzione spettrale e geometrica, al fine di garantire un buon rendimento radiometrico.

Si ritiene a questo punto importante mettere in evidenza un tipico aspetto operativo caratteristico per tutti i principali sistemi di osservazione, e cioè la minor risoluzione spaziale dei sensori operanti nella banda dell'infrarosso termico rispetto a quelli operanti nel campo del visibile. Tale "fenomeno" trova spiegazione sulla base della teoria quantistica di Planck: essendo infatti inferiore l'energia elettromagnetica associata a lunghezze d'onda lunghe, come appunto l'infrarosso termico, è necessario utilizzare pixel a terra aventi dimensione maggiore per poter disporre di energia a sufficienza per eseguire la misura.

Da quanto detto emerge che le informazioni su un dato target direttamente osservabili da un sistema di telerilevamento sono limitate: si possono infatti misurare la distanza, la riflettività ed una combinazione di temperatura ed emissività. Inoltre, sono necessari diversi sensori per ottenere tutte queste informazioni congiuntamente. Tuttavia, si possono incrementare le variabili a disposizione misurando le grandezze di interesse in differenti istanti temporali, a diverse lunghezze d'onda, ossia in diverse bande spettrali ed utilizzando diverse polarizzazioni della radiazione.

2. Le immagini nel Telerilevamento

I dati del Telerilevamento, siano essi numeri o immagini, sono rappresentazioni di scene reali: in quanto tali, costituiscono il risultato di un processo di trasferimento che si svolge sulla base delle specifiche tecniche degli apparati strumentali impiegati. Tali caratteristiche sono legate ai concetti di risoluzione che controllano la fedeltà con la quale viene effettuata l'operazione di trasferimento della scena rilevata.

Le immagini telerilevate costituiscono quindi una rappresentazione del mondo reale ottenuta attraverso un processo di trasferimento di informazioni basato sulle interazioni della radiazione elettromagnetica con le superfici fisiche.

Le differenti tipologie di sensori installati a bordo dei satelliti rilevano la radianza relativa ai canali sui quali eseguono la misura, in forma analogica, sotto forma di un segnale elettrico la cui ampiezza varia nel tempo, proporzionalmente alla radiazione incidente sul rilevatore. Per poter essere memorizzati ed elaborati, i segnali elettrici prodotti dal sensore vengono campionati e convertiti in valori numerici, ottenendo così i DN.

2.1 Caratteri di un'immagine telerilevata

Nel Telerilevamento, un'immagine è una funzione bidimensionale che associa la rappresentazione di una scena osservata ad un insieme di informazioni relative alle interazioni della radiazione elettromagnetica con le superfici fisiche poste nel suo campo di osservazione.

Le immagini telerilevate sono immagini digitali di tipo raster: con l'immagine raster, il territorio viene rappresentato mediante una matrice di pixel, ognuno dei quali è caratterizzato da un numero intero positivo, il DN, che corrisponde alla radianza media, misurata elettronicamente, dell'area a terra coperta da ciascun pixel. Il DN può essere reso visivamente con un colore o con una sfumatura di grigio, e il numero di sfumature utilizzato per la rappresentazione dipende dalla memoria che si assegna a ciascun pixel, espressa in bit, e corrisponde alla risoluzione radiometrica del sistema di osservazione.

Ogni pixel costituente l'immagine raster risulta quindi caratterizzato da una terna di valori:

- le due variabili spaziali x e y , corrispondenti agli indici di riga e di colonna, che individuano la posizione del pixel all'interno dell'immagine

- il DN, correlato all'intensità della radianza al suolo, che indica il valore del livello di grigio assunto da ogni singolo pixel.

I DN sono valori interi positivi che risultano da una quantizzazione dell'originale segnale elettrico, attraverso un processo di conversione del segnale analogico – digitale, che li traduce in livelli di grigio o di intensità luminosa.

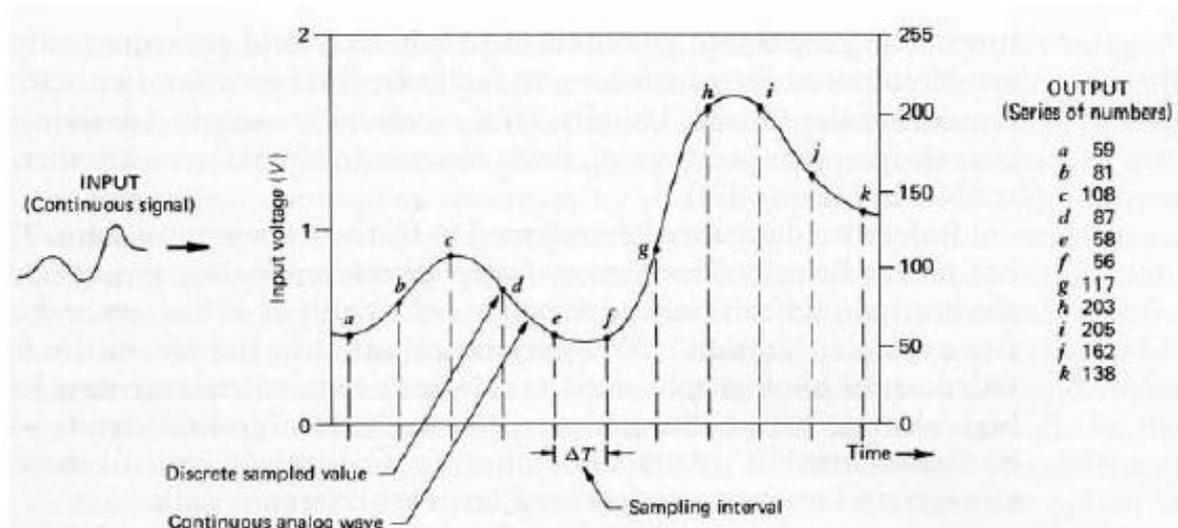


Figura 8. Quantizzazione di un segnale analogico attraverso un processo di conversione A/D

Ogni banda spettrale del sensore ha una funzione di risposta caratteristica per eseguire la conversione A – D, i cui parametri vengono calcolati e monitorati nel tempo usando specifici sistemi a bordo. La funzione di risposta radiometrica per un canale viene generalmente rappresentata attraverso una funzione di conversione di tipo lineare espressa da:

$$DN = GL_{\lambda} + B$$

DN = Digital Number fornito in output;

G = guadagno o gain;

L_{λ} = radianza spettrale incidente sul rilevatore;

B = intercetta o offset, ovvero segnale residuo quando $L_{\lambda} = 0$.

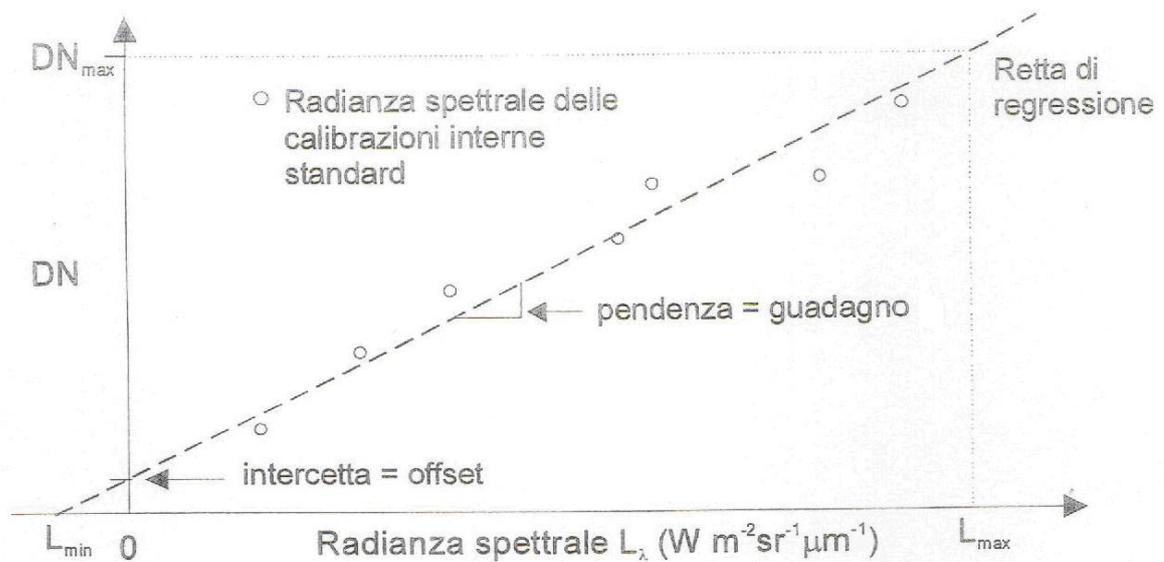


Figura 9. Funzione di risposta radiometrica per un singolo canale

Nel processo di acquisizione dell'immagine mediante un sensore, il segnale in ingresso è costituito dai valori di radianza L proveniente dalla scena osservata ed il segnale di uscita è invece costituito dai valori assunti dai DN all'interno dell'immagine.

Un'immagine telerilevata è quindi una matrice di numeri, che deriva dall'aver tradotto in valori numerici la quantità d'energia emessa o riflessa da un oggetto. Questi numeri, per poter essere percepiti come immagine, devono subire un processo inverso di trasformazione dal numerico all'analogico.

Generalmente, in Telerilevamento, la radiazione raccolta dal sistema di osservazione viene scomposta attraverso un apposito sistema di prismi in diverse componenti spettrali, ognuna delle quali colpisce un apposito rilevatore dedicato, permettendo così di eseguire contemporaneamente più misure in diverse bande spettrali. Nel caso di riprese multispettrali, lavorando cioè su differenti intervalli dello spettro elettromagnetico, si ottengono più immagini, e quindi più matrici, della medesima scena osservata, una per ogni banda investigata.

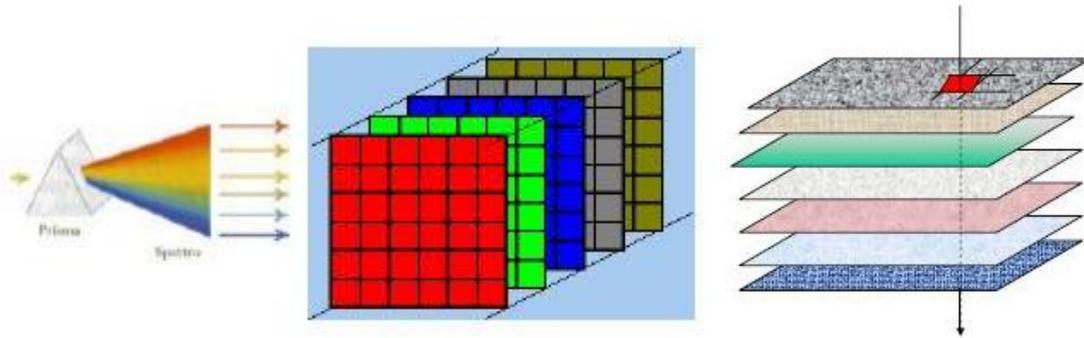


Figura 10. Significato di una ripresa multispettrale

In tal caso, la cella elementare di risoluzione, ossia il pixel dell'immagine, non è più costituita da una singola misura radiometrica, ma può essere considerata come un vettore di misure, composto da tanti DN quante sono le bande spettrali dell'immagine multispettrale.

Inoltre, nelle diverse bande spettrali cambia la risposta fra i possibili tipi di superficie terrestre che riflettono in modo diverso l'energia solare: analizzando quindi la risposta rilevata dal sensore alle diverse lunghezze d'onda è possibile discriminare la differente tipologia di superficie.

Quanto più è elevato il numero di bande investigato da un sistema di Telerilevamento, tanto più precisa risulta la discriminazione tra i diversi tipi di superficie.

2.1.1 Visualizzazione delle immagini telerilevate

Come anticipato, per poter visualizzare un'immagine telerilevata sul monitor di un computer, i DN che la compongono devono subire un processo inverso di conversione rispetto a quello che li ha generati, ovvero una conversione dal digitale all'analogico.

La matrice di numeri risultante dalla conversione A – D viene trasformata in immagine utilizzando una specifica funzione di trasferimento, attraverso la quale è possibile passare dai valori dei pixel della matrice alla luminosità di visualizzazione sullo schermo.

Visualizzando un'immagine acquisita in un'unica banda spettrale, i pixel con valori bassi vengono rappresentati con livelli di grigio scuri (DN = 0 corrisponde al nero), mentre quelli con valori via via crescenti vengono rappresentati con livelli di grigio sempre più chiari sino a raggiungere il bianco in corrispondenza del valore DN = 255.

Pertanto, quando un'immagine digitale è visualizzata sul monitor di un computer, ogni punto dello schermo riceve un'intensità di luce, o livello di grigio, relazionata al DN che caratterizza il pixel corrispondente e dipendente dalla funzione di trasferimento scelta.

Come sottolineato in precedenza, in generale nel Telerilevamento i dati a disposizione sono costituiti da immagini multispettrali, ossia immagini acquisite in diverse bande dello spettro elettromagnetico. Al fine di sfruttare al meglio la ricchezza delle informazioni in esse contenute, le immagini non vengono rappresentate in livelli di grigio, ma mediante l'utilizzo del colore, attraverso il principio della sintesi additiva dei tre colori fondamentali RGB: Red (rosso), Green (verde), Blue (blu).
Sugli schermi dei computer, il colore viene infatti visualizzato secondo il modello additivo, ovvero aggiungendo energia luminosa al nero, dando origine ad una vastissima gamma di colori. Ogni elemento dello schermo è costituito da un gruppo di tre fosfori che, quando vengono eccitati, emettono luce nei tre colori primari additivi con un'intensità proporzionale al segnale elettrico eccitante. Al valore massimo di intensità dei tre colori primari corrisponde il bianco ed al minimo il nero. Un generico colore viene rappresentato da un vettore nel quale le tre componenti del sistema, ossia i primari RGB, definiscono le intensità dei fasci elettronici che vanno a colpire i tre fosfori relativi. Lo spazio vettoriale così definito, e chiamato RGB, può essere rappresentato da un cubo in una semplice terna cartesiana, dove la diagonale maggiore, individuata dai colori composti con uguali valori dei tre colori primari, rappresenta l'asse dei grigi, dal nero al bianco.

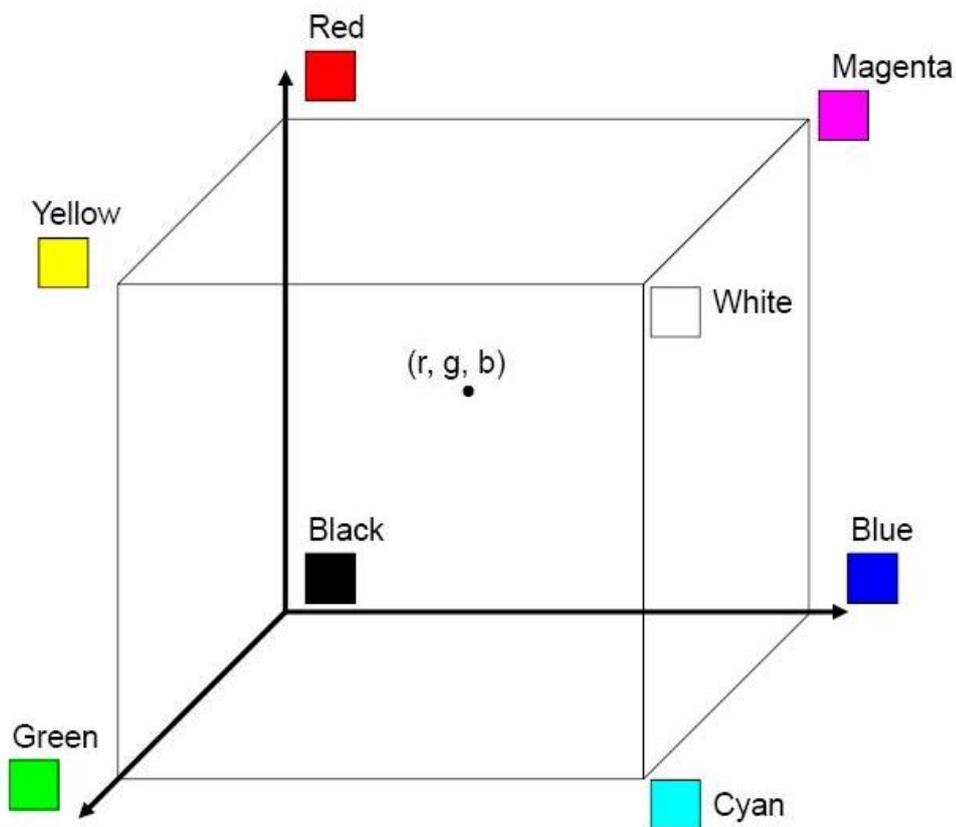


Figura 11. Spazio RGB: ogni colore risulta dalla sintesi additiva dei tre colori primari rosso, verde e blu

Data un'immagine multispettrale è possibile visualizzare contemporaneamente un massimo di tre bande spettrali, associando ad ogni banda un colore primario additivo. Le rappresentazioni che si possono ottenere sul monitor di un computer si suddividono in tre grandi tipologie:

- a. immagine in bianco e nero: viene visualizzata una singola banda spettrale, ottenendo sullo schermo diverse sfumature di grigio;
- b. immagine a colori naturali: vengono visualizzate le tre bande spettrali del rosso, verde e blu, associando ad ognuna di esse il rispettivo colore fondamentale, cioè associando il colore blu alla banda spettrale del blu, il colore rosso alla banda spettrale del rosso ed il colore verde alla banda spettrale del verde;
- c. immagine a falsi colori: è una rappresentazione senza relazione fra la banda spettrale in cui è stata acquisita l'immagine ed il colore con cui viene rappresentata.

Per un'immagine multispettrale è pertanto possibile una qualsiasi associazione fra banda spettrale e colore di visualizzazione; la migliore rappresentazione sarà data da quell'opportuna combinazione che meglio evidenzia le informazioni ricercate e permette di ottenere la migliore discriminabilità fra le diverse superfici osservate.

2.2 La pre – elaborazione delle immagini telerilevate

Le immagini satellitari, al momento del rilevamento, contengono delle distorsioni geometriche e radiometriche dovute al sistema di acquisizione (piattaforma e sensore), al mezzo di propagazione del segnale (atmosfera), all'angolo di ripresa ed all'effetto della curvatura terrestre. Ogni immagine telerilevata “grezza” è quindi affetta da un certo numero di difetti ed errori, dipendenti dalla sua tipologia e risoluzione, che ne impedirebbero il corretto utilizzo nelle applicazioni cartografiche.

Con il termine pre – elaborazione si fa riferimento ad un complesso di procedure e metodologie aventi la finalità di correggere i difetti e le problematiche inevitabilmente presenti nelle immagini telerilevate. Tali elaborazioni, preliminari all'utilizzo effettivo dei dati telerilevati, costituiscono una condizione necessaria per permettere all'utente di utilizzare i dati acquisiti al massimo della loro potenzialità e del loro contenuto informativo. E' opportuno mettere subito in evidenza che la necessità di eseguire le differenti operazioni di correzione delle immagini dipende dal tipo di analisi per le quali tali immagini devono essere utilizzate, come verrà illustrato in seguito.

Le correzioni alle quali vengono generalmente sottoposte le immagini telerilevate possono essere distinte e raggruppate in due tipologie principali:

- correzione o calibrazione radiometrica: eliminazione delle distorsioni del segnale dovute sia

all'influenza delle condizioni esterne al momento dell'acquisizione (atmosfera, illuminazione, topografia) sia al malfunzionamento dei sensori (calibrazione del sensore);

- correzione geometrica: eliminazione delle deformazioni spaziali sia di tipo sistematico (curvatura e rotazione terrestre) sia di tipo non sistematico (variazioni di quota, velocità ed assetto della piattaforma e distorsioni relative al sensore) introdotte nell'immagine dal sistema di ripresa.

Quando si acquista un'immagine occorre scegliere il suo livello di pre – elaborazione: le correzioni radiometriche e quelle relative alle distorsioni geometriche sistematiche vengono normalmente effettuate dal fornitore prima del rilascio delle immagini, mentre i diversi livelli di correzione delle distorsioni geometriche non sistematiche determinano le differenti tipologie di prodotto.

2.2.1 La calibrazione radiometrica

La calibrazione radiometrica ha lo scopo di eliminare le distorsioni del segnale dovute al cattivo funzionamento dei sensori e all'influenza delle condizioni esterne al momento dell'acquisizione, legate sia alle diverse condizioni di illuminazione sia al diverso stato dell'atmosfera interposta tra il sensore e la scena osservata.

La calibrazione radiometrica delle immagini telerilevate consiste nell'applicazione di una serie di procedure aventi la finalità di stimare correttamente la riflettività dell'oggetto osservato a partire dalla misura di radianza effettuata: si lavora, cioè, sul significato fisico dei DN, al fine di stimare correttamente la riflettività dell'oggetto in studio.

L'utilità quantitativa dei dati telerilevati è infatti massimizzata calibrando tali dati ad un valore di riflessione della superficie a terra: i DN di un'immagine satellitare, infatti, non possono essere considerati rappresentativi delle effettive condizioni della superficie a causa di una varietà di effetti, come la variabile attenuazione atmosferica, la geometria di illuminazione e le caratteristiche del sensore.

Tale processo è realizzato attraverso tre fasi differenti, che rappresentano tre livelli di affinamento successivo, per ognuna delle quali sono richieste informazioni aggiuntive:

- A. calibrazione del sensore: conversione da DN a radianza al sensore;
- B. calibrazione atmosferica: conversione da radianza al sensore a radianza alla superficie;
- C. correzione solare e topografica: conversione da radianza a riflettanza alla superficie.

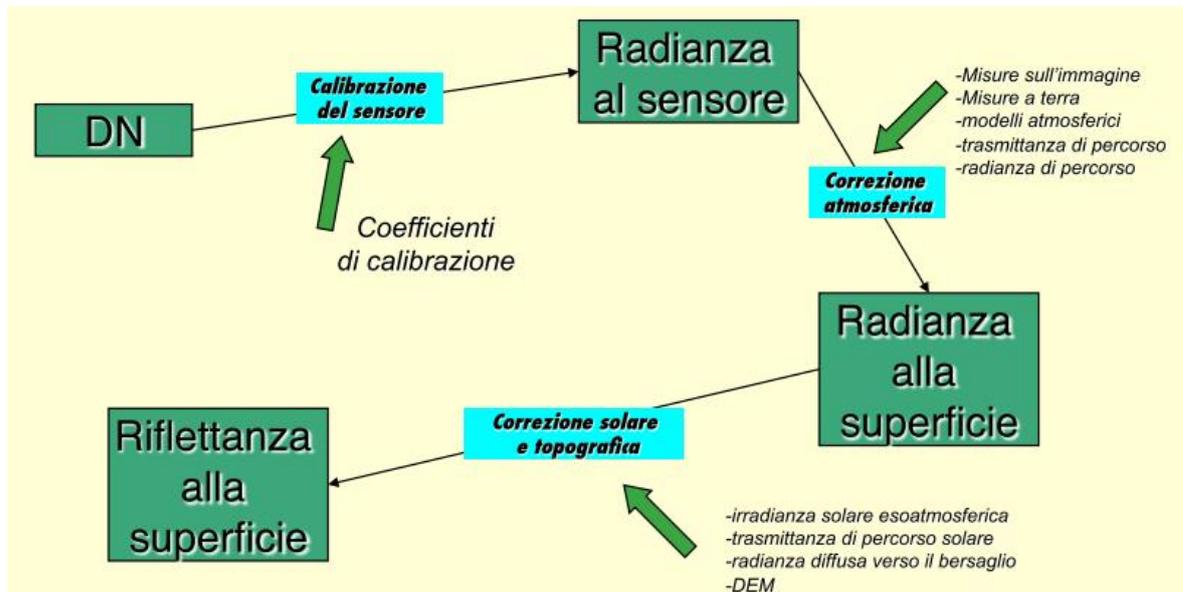


Figura 12. Il flusso delle elaborazioni per la calibrazione radiometrica

A. Calibrazione del sensore

Uno degli aspetti fondamentali riguardanti gli strumenti di misura e quindi anche i sensori è la capacità di garantire misure confrontabili nel tempo, cioè misure che abbiano valori assoluti e riferimenti di calibrazione stabili.

La calibrazione radiometrica di un sensore risulta fondamentale al fine di correlare il segnale osservato alla radianza effettiva L_{λ} che raggiunge il sensore. L'informazione spettrale rilevata, infatti, non corrisponde esattamente a quella del target d'interesse al suolo, perché risente dell'influenza dei pixel circostanti e dell'effetto atmosferico, che comportano un aumento del valore di radianza registrato al sensore.

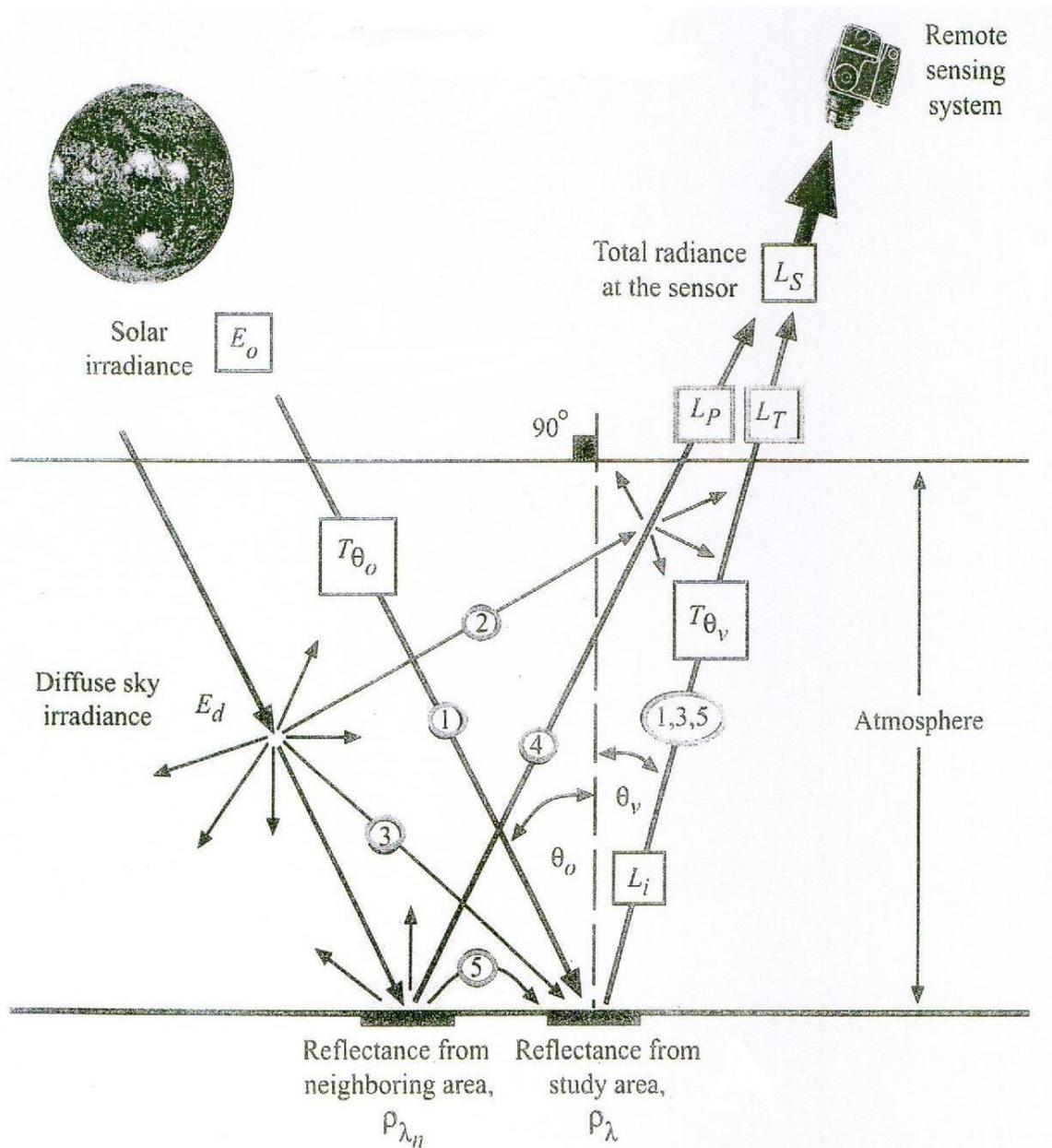


Figura 13. Vari contributi di path radiance ricevuti da un sistema di Telerilevamento

La radianza totale misurata dal sensore L_S , infatti, è frutto di vari contributi, schematizzabili principalmente come:

$$L_S = L_T + L_P$$

L_T = radianza dovuta alle informazioni spettrali sul target d'interesse a terra e derivante dai percorsi 1,3,5

L_P = radianza di percorso (path radiance), ossia radianza dovuta agli effetti di diffusione atmosferica ed al contributo di aree adiacenti al target d'interesse e derivante dai percorsi 2,4.

Tali contributi di path radiance introducono il cosiddetto rumore radiometrico, che è necessario eliminare al fine di consentire un corretto processo di interpretazione dell'immagine.

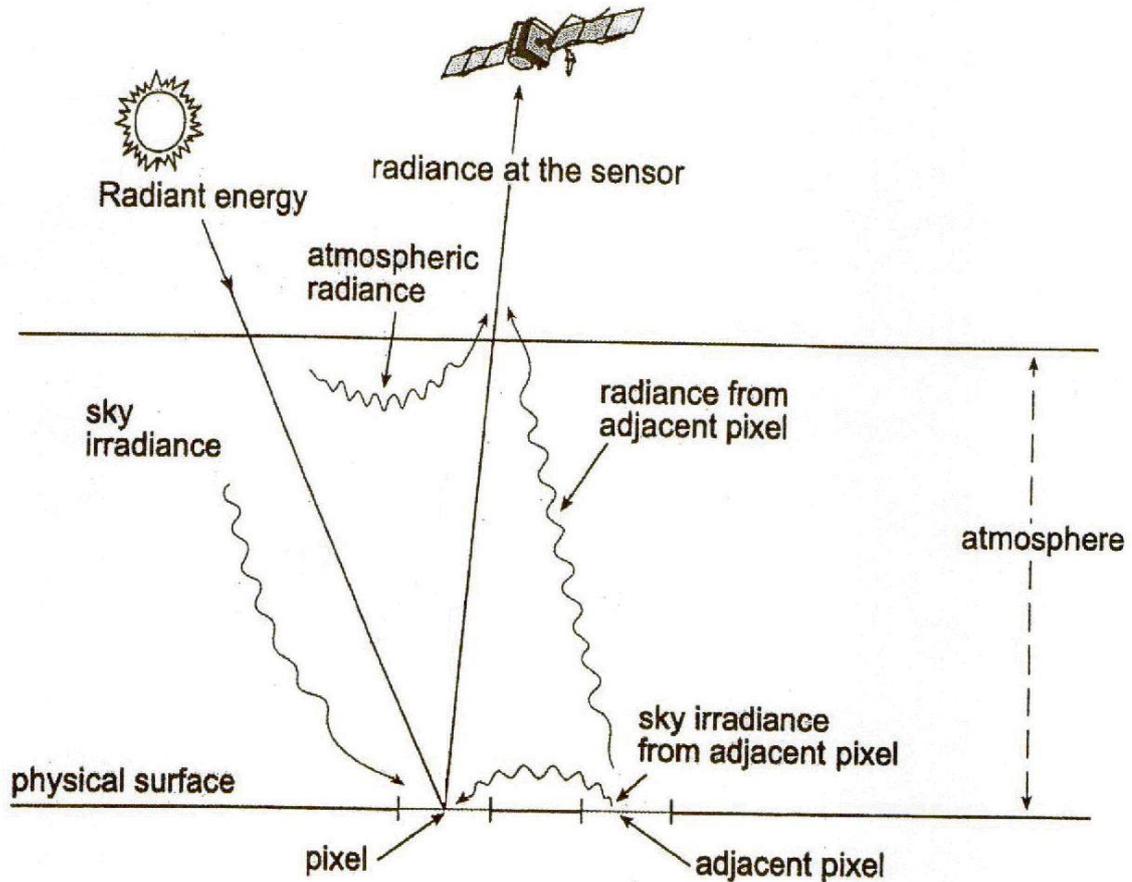


Figura 14. Complesso di effetti che influenzano il valore di radianza misurato al sensore

Si presenta quindi la seguente problematica: quando si esegue la rilevazione non viene misurato esclusivamente il comportamento effettivo del target d'interesse, ma anche un complesso di altri processi; risulta pertanto necessario eliminare i fenomeni che influenzano il valore di radianza misurato al sensore applicando opportuni modelli di correzione.

B. Calibrazione atmosferica

La calibrazione atmosferica di immagini ottiche cerca di minimizzare gli effetti conseguenti all'attraversamento dell'atmosfera (assorbimento e diffusione) ed è essenziale per molteplici applicazioni del Telerilevamento che cercano di individuare determinate superfici di copertura a terra in base alle curve di riflettanza nota.

La radianza vista dal sensore non è integralmente attribuibile al bersaglio osservato e non ne è quindi rappresentativa, dato che esistono una serie di contributi aggiuntivi dovuti all'atmosfera che devono essere rimossi, al fine di valutare correttamente la radianza relativa allo specifico target d'interesse a terra.

La correzione atmosferica rappresenta una delle problematiche di maggiore criticità nel pre – processamento delle immagini satellitari. L'atmosfera influenza i dati telerilevati attraverso due modalità differenti: smorza la radiazione (assorbimento) ed agisce come una sorgente fittizia (scattering). Infatti, una parte della radiazione che viene diffusa, chiamata radiazione di percorso, viene deviata dall'atmosfera direttamente al sensore senza fornire informazioni sugli oggetti al suolo. L'effetto della diffusione, pertanto, si manifesta con una componente additiva che aumenta i valori di radianza misurati al sensore.

Ne consegue che risulta indispensabile eseguire la correzione degli effetti atmosferici dalle immagini se si opera sul rapporto fra due bande, se si vogliono dedurre dai DN le proprietà degli oggetti, se si vogliono eseguire analisi multitemporali, confrontando cioè i risultati ottenuti ad una certa data con quelli di un'altra, ecc.

Sono attualmente disponibili numerose tecniche per la taratura della riflettanza, che permettono di passare dai valori di radianza misurati al sensore, o dai DN “grezzi”, ai valori di riflettanza delle superfici a terra. Tali tecniche possono essere distinte in due grandi tipologie:

- metodi di tipo relativo, basati esclusivamente sulle immagini;
- metodi di tipo assoluto, basati, invece, su modelli matematici semplificati, che permettono di valutare la trasmittanza atmosferica, modellando opportunamente i fenomeni di assorbimento e diffusione.

C. Correzione solare e topografica

Consiste nell'applicazione di metodi per la normalizzazione dei dati delle immagini acquisite:

- in stagioni differenti, per le quali cambia quindi la distanza Sole – Terra;
- sotto differenti condizioni di illuminazione solare, in quanto permettono di considerare l'effettiva posizione del Sole al momento della rilevazione, mentre i DN delle immagini assumono che il Sole si trovi allo zenit.

Oltre a queste correzioni di tipo solare è anche necessario applicare un modello di correzione del terreno, ossia un DTM – Digital Terrain Model, per tenere in considerazione la morfologia del territorio osservato.

Le correzioni finora considerate hanno la funzione di eliminare gli effetti presenti nelle immagini legati all'influenza delle condizioni esterne, che rappresentano distorsioni di tipo ordinario, presenti in maniera differente a seconda delle condizioni al momento della ripresa. Oltre a tale tipologia di effetti, nelle immagini possono anche presentarsi distorsioni dovute al malfunzionamento della strumentazione utilizzata; fra queste, le correzioni eseguite con maggiore frequenza consistono nel ripristino di linee e pixel saltati e nell'equalizzazione delle risposte dei sensori.

Riepilogando, la procedura generale per la calibrazione radiometrica delle immagini telerilevate risulta strutturata secondo le seguenti fasi:

- ✓ conversione dei DN in radianze spettrali;
- ✓ conversione delle radianze spettrali in riflettanza apparente al sensore;
- ✓ correzione atmosferica per ottenere la riflettanza al suolo;
- ✓ riconversione dell'immagine corretta in radianza e poi in DN.

2.2.2 La correzione geometrica

Le deformazioni geometriche sono dovute a fattori legati alle relazioni geometriche del sistema sensore – piattaforma – bersaglio, come: il movimento relativo della Terra e del satellite, le caratteristiche del sistema di acquisizione (ampiezza del FOV, ripresa non nadirale, ecc.), la curvatura della Terra e la presenza di rilievi sulla stessa, le variazioni di posizione della piattaforma durante l'acquisizione dell'immagine, ecc.

La correzione geometrica delle immagini satellitari ha quindi lo scopo di eliminare le deformazioni spaziali introdotte dal complesso dei fenomeni sopra citati e dalle loro interazioni, al fine di generare una nuova immagine con le proprietà di scala e di proiezione di una rappresentazione cartografica. Rappresenta, pertanto, un processo di correzione che permette di rendere l'immagine acquisita geometricamente congruente con il riferimento prescelto, instaurando cioè una perfetta corrispondenza fra la posizione del pixel nell'immagine e la sua collocazione sul territorio.

In particolare, come anticipato, le distorsioni geometriche possono essere distinte in due grandi tipologie:

- sistematiche, presenti cioè in tutte le immagini acquisite da uno stesso sensore, e dovute alla rotazione terrestre ed alla curvatura della superficie della Terra;
- non sistematiche, presenti in differente misura nelle immagini acquisite da un medesimo sensore, e dovute ai movimenti ed all'orbita del satellite.

Le correzioni per eliminare le distorsioni geometriche di tipo sistematico sono normalmente realizzate applicando opportune formule derivanti dalla modellizzazione matematica delle loro sorgenti, mentre tutte le altre tipologie di distorsione devono essere corrette mediante l'analisi di punti di controllo (GCP – Ground Control Points) adeguatamente distribuiti all'interno dell'immagine. I GCP sono punti di riferimento di sicura localizzazione al suolo e facilmente individuabili su un'immagine digitale, definiti sia come coordinate immagine sia come coordinate geografiche.

I valori delle coordinate al suolo dei GCP sono utilizzati per identificare, attraverso regressione ai minimi quadrati, delle funzioni di trasformazione aventi lo scopo di deformare l'immagine di partenza, collocandola correttamente nel sistema di riferimento prescelto. Il risultato è una matrice vuota legata a quella iniziale dalle funzioni di trasformazione: sono proprio le inverse di tali funzioni di trasformazione che consentono di “riempire” la matrice corretta, determinando i valori dei pixel dell'immagine corretta sulla base di quelli dell'immagine di partenza non corretta.

La correzione delle distorsioni geometriche si ottiene, pertanto, mediante georeferenziazione e successivo raddrizzamento (ortorettifica) dell'immagine acquisita dal sensore:

- il processo di georeferenziazione consiste nell'orientamento dell'immagine in un dato sistema di riferimento,
- il processo di ortorettifica rimuove le variazioni di scala introdotte nelle immagini dalle differenze altimetriche della superficie attraverso l'utilizzo di un modello digitale del terreno (DTM).

Il prodotto che si ottiene è un'ortofoto, ossia un'immagine georeferenziata e geometricamente corretta che costituisce un'accurata rappresentazione della superficie della Terra, e può essere opportunamente utilizzata in ambito GIS, ovvero all'interno dei Sistemi di Informazione Geografica.

Ricapitolando, il trattamento delle distorsioni geometriche avviene attraverso la definizione di modelli che stabiliscono relazioni matematiche fra le coordinate oggetto (o terreno) e le corrispondenti coordinate immagine. In letteratura, i modelli di correzione geometrica vengono classificati in due grandi categorie:

- modelli empirici o non parametrici, che si basano su equazioni nelle quali compaiono coefficienti che non hanno alcun rapporto con la geometria di presa e non presentano quindi alcun significato fisico;
- modelli fisico – geometrici o parametrici, che utilizzano, invece, coefficienti aventi un preciso significato fisico e geometrico, rappresentanti, in genere, i parametri di posizionamento della piattaforma e quelli ottico – geometrici del sensore e della geometria di presa.

Per qualsiasi modello di correzione geometrica è necessario individuare due differenti set di punti:

- a) punti di controllo, da utilizzare per trovare la trasformazione migliore per passare dalle coordinate immagine alle coordinate terreno;
- b) punti di verifica, da utilizzare per valutare l'accuratezza della trasformazione adottata.

Una volta eseguita la correzione geometrica dell'immagine, è necessario determinare il valore da assegnare ad ogni pixel della matrice corretta. Le procedure che consentono di attribuire i valori di radianza dei pixel dell'immagine di partenza alle celle dell'immagine finale corretta sono comunemente note come tecniche di ricampionamento. Il valore da assegnare può essere definito attraverso diversi criteri che possono però alterare l'informazione radiometrica originaria.

3. La classificazione delle immagini telerilevate

L'analisi di un'immagine digitale corrisponde all'estrazione delle informazioni implicitamente contenute e registrate nell'immagine stessa allo scopo di fornire un'esplicita descrizione del mondo reale.

Nell'ambito dell'analisi delle immagini, l'elaborazione che riveste un'importanza fondamentale per l'estrazione di informazioni utili dai dati grezzi è il procedimento di classificazione, il quale fornisce un prodotto finale di pratico ed immediato utilizzo.

Con il termine classificazione si intende qualsiasi analisi attraverso la quale una serie di dati vengono assegnati in un certo numero di classi, raggruppando così tutti i pixel di un'immagine digitale in particolari argomenti. L'immagine che deriva da un procedimento di questo tipo è una mappa tematica dell'immagine originale, ossia del territorio osservato. La mappa tematica rappresenta, quindi, un'immagine costituita da un insieme di pixel ai quali viene associata, oltre alle coordinate spaziali, anche un'informazione di tipo semantico relativa ad uno specifico tema: la classe. Attraverso il processo di classificazione si passa così da un'immagine composta da DN ad un'immagine di classi e corrispondenti categorie di usi del suolo.

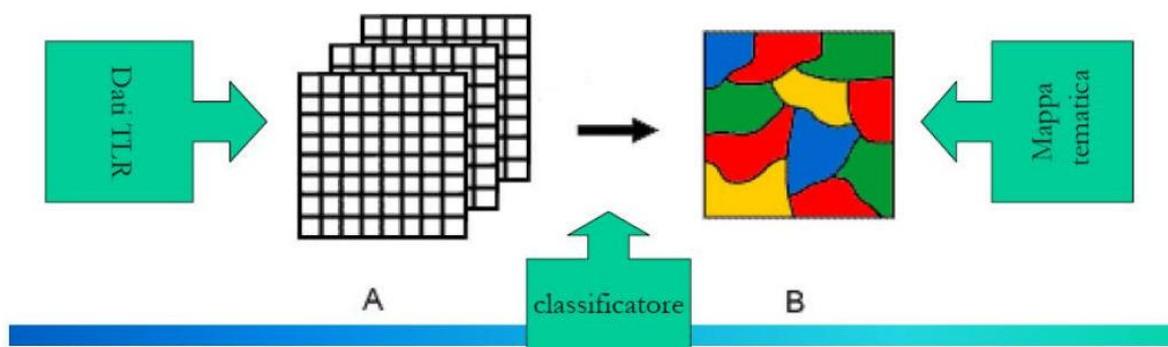


Figura 15. Schematizzazione concettuale del processo di classificazione

Il processo di classificazione opera in uno spazio multidimensionale associato alle misure, definito spazio delle caratteristiche o spazio multispettrale; tale spazio, in particolare, è uno spazio k - dimensionale, ove k rappresenta il numero di informazioni disponibili per ogni singolo pixel e coincide pertanto con il numero delle bande spettrali acquisite. Nello spazio delle caratteristiche, l'interpretazione delle misure associate ad un oggetto permette di classificarlo in una determinata classe attraverso la definizione di regole di decisione che si realizzano mediante la costruzione di

apposite funzioni.

A seconda di come vengono definite, tali funzioni di decisione possono essere distinte in due grandi categorie:

- funzioni densità di probabilità nel contesto della teoria statistica;
- funzioni di appartenenza nel contesto degli insiemi sfumati o fuzzy.

Sulla base di questa distinzione si possono individuare le due seguenti tipologie di approccio alla classificazione:

- metodi convenzionali, basati sulla logica booleana di vero o falso, per i quali ogni pixel appartiene esclusivamente ad una specifica classe, operanti una classificazione definita hard;
- metodi non convenzionali, che adottano una logica multivalore per cui ogni pixel può appartenere a più classi e che realizzano una classificazione definita soft.

Il risultato di una classificazione hard è quindi rappresentato da un'unica mappa tematica costituita da N classi, mentre il risultato di una classificazione soft è rappresentato da N mappe tematiche, una per ogni classe, che quantificano, per ogni pixel dell'immagine, la probabilità di appartenenza ad una specifica classe.

Il criterio fondamentale che sta alla base dei metodi di classificazione è quello di similarità fra oggetti: si tratta, infatti, di suddividere i pixel dell'immagine in classi caratterizzate da un certo grado di associazione, generalmente costituito dalla configurazione della risposta spettrale delle differenti superfici di copertura a terra.

Nell'ambito della classificazione delle immagini, quando si parla di classi è importante distinguere fra le due seguenti tipologie:

- ✓ classi tematiche o classi d'informazione, che costituiscono la legenda definita dall'utente e rappresentano cioè le classi risultanti dal processo di classificazione, che saranno contenute nella mappa tematica finale;
- ✓ classi spettrali, che rappresentano raggruppamenti di pixel aventi un comportamento molto simile.

Concettualmente, i pixel appartenenti ad una medesima tipologia di copertura a terra, ossia alla medesima classe informativa, tendono a raggrupparsi in determinate zone dello spazio delle caratteristiche formando nuvole di punti, o cluster, che identificano le classi spettrali. Operativamente, però, a causa di un complesso di fattori, quali la variabilità atmosferica, la situazione topografica, le diverse condizioni d'illuminazione, la presenza di pixel misti, ecc., una stessa classe d'informazione può risultare costituita da più classi spettrali che presentano un certo grado di variazione e di dissociazione fra di loro.

La classificazione di un'immagine multispettrale risulterà quindi tanto più accurata quanto più è elevato il grado di separazione delle varie classi nello spazio delle caratteristiche.

Le tecniche di classificazione possono essere distinte e raggruppate in due grandi categorie:

- tecniche pixel – based, basate esclusivamente sulle informazioni spettrali dei singoli pixel presenti nell'immagine;
- tecniche object – based, che utilizzano informazioni legate a gruppi di pixel, considerando le interrelazioni fra pixel contigui.

Le tradizionali procedure di classificazione sono di tipo pixel – based: gli algoritmi di classificazione operano su pixel individuali analizzando l'informazione radiometrica, ossia il valore di digital number, di ogni singolo pixel presente nell'immagine. L'assegnazione dei pixel alle classi avviene quindi a livello del singolo pixel e dipende esclusivamente dal suo contenuto spettrale, tralasciando completamente l'informazione fornita dai rapporti geo – spaziali all'interno dell'immagine.

La procedura di classificazione object – based, invece, non considera singoli pixel, ma aggregazioni di pixel, ed è il risultato di un processo caratterizzato da un maggiore contenuto informativo. Tale approccio, infatti, oltre alle informazioni di riflettanza spettrale, contenute nell'immagine da classificare sotto forma di valori di grigio dei pixel, utilizza anche un altro genere di informazioni, come, ad esempio, la tessitura, le relazioni geo – spaziali, il contesto ed i rapporti dimensionali.

Nel proseguo di questo elaborato verrà trattata nel dettaglio solamente la famiglia di classificazione pixel – based, poiché utilizzata per l'elaborazione dei dati.

3.1 Tecniche di classificazione pixel – based

Le tecniche di classificazione pixel – based possono essere concettualmente distinte, a loro volta, in due grandi famiglie:

- metodi di classificazione semiautomatici o supervisionati (supervised classification);
- metodi di classificazione automatici o non supervisionati (unsupervised classification).

I metodi supervisionati richiedono che sia definito a priori il numero e la natura delle classi che si intendono rappresentare nella mappa tematica: per ognuna delle classi d'informazione l'analista deve identificare un numero sufficiente di pixel in modo da poter costruire il modello della classe e la relativa funzione di decisione, mediante la quale i pixel vengono assegnati ad una particolare classe.

I metodi supervisionati si basano quindi sull'acquisizione di un certo numero di pixel di training per ciascuna classe del sistema di nomenclatura che si intende adottare, in modo da creare una firma spettrale caratteristica e distintiva per ogni classe considerata. Le firme spettrali dei pixel da classificare vengono poi confrontate con quelle dei pixel di training: ai pixel incogniti viene attribuita la classe con firma spettrale più simile.

Per questa tipologia di metodi, quindi, l'utente seleziona nell'immagine delle aree, ossia dei pixel, corrispondenti alle classi tematiche che intende estrarre e rappresentare nella classificazione. Questi pixel serviranno come set di training e rappresentano il punto di partenza per definire un criterio, o algoritmo, con il quale associare gli altri pixel dell'immagine alle differenti classi tematiche.

I metodi non supervisionati, al contrario, non richiedono la fase preliminare di acquisizione dei pixel di training: la classificazione opera una suddivisione dello spazio delle caratteristiche in un certo numero di classi spettrali in base alla similarità della loro firma spettrale (cluster analysis). La classificazione non supervisionata ha quindi lo scopo di individuare nello spazio delle caratteristiche un certo numero di cluster, senza richiedere il contributo di informazioni aggiuntive a priori.

Eseguita la classificazione, ossia assegnati i pixel dell'immagine alle differenti classi spettrali individuate dal classificatore, l'analista identifica le classi tematiche da associare alle classi spettrali, definendo così la legenda della classificazione.

Per tale tipologia di classificazione, quindi, l'analista non fornisce alcuna informazione a priori sull'area in esame: è direttamente il classificatore ad individuare, attraverso iterazioni successive, dei raggruppamenti di pixel che presentano comportamenti spettrali omogenei. Successivamente, è l'analista che attribuisce un significato alle classi così definite.

Ricapitolando, con la classificazione supervisionata si richiede che l'utente definisca a priori le classi d'informazione, ossia la legenda della mappa tematica, e riconosca un certo numero di pixel come rappresentativi per ognuna delle classi da rappresentare, attraverso i quali addestrare l'algoritmo a riconoscere le caratteristiche delle differenti classi. Con la classificazione non supervisionata, invece, l'utente interviene solo a posteriori, definendo la legenda della mappa tematica sulla base delle classi spettrali riconosciute dal classificatore mediante una particolare regola di decisione.

Nel proseguo di questo elaborato verranno trattati nel dettaglio solamente i metodi di classificazione supervisionati, poiché principalmente utilizzati per l'elaborazione dei dati.

3.1.1 Metodi supervisionati

Il processo di classificazione supervisionata risulta caratterizzato da quattro elementi fondamentali:

- definizione della legenda: si decidono le classi d'informazione, ossia le tipologie di copertura presenti nell'immagine, che si vogliono individuare;
- scelta dei pixel di training ed addestramento: definizione di un insieme di pixel rappresentativi per ognuna delle classi di interesse che si intende rappresentare, che costituiscono il prototipo della classe; tali pixel formano il riferimento per addestrare l'algoritmo e servono per costruire le regole di decisione per l'assegnazione dei pixel incogniti;
- assegnazione: utilizzando le funzioni di decisione definite in precedenza, tutti i pixel vengono assegnati ad una specifica classe tematica d'interesse;
- validazione: viene valutato il processo di classificazione attraverso l'analisi degli errori della mappa tematica, ottenuta come risultato del processo di classificazione.

La classificazione supervisionata costituisce l'approccio maggiormente utilizzato per l'analisi quantitativa delle immagini telerilevate, e, come precedentemente spiegato, richiede che sia definito a priori il numero e la tipologia delle classi che si vogliono rappresentare nella mappa tematica finale.

L'analista deve quindi identificare e riconoscere, per ognuna delle classi da rappresentare, un numero di pixel sufficiente in maniera tale da costruire il modello della classe e la relativa funzione di decisione nello spazio delle caratteristiche attraverso la quale assegnare i pixel incogniti ad una determinata classe. Si debbono quindi individuare nell'immagine dei raggruppamenti di pixel, generalmente definiti aree di addestramento o training sites, il più possibile omogenei e rappresentativi, che serviranno ad addestrare l'algoritmo di classificazione affinché associ ogni pixel dell'immagine ad una data categoria.

Su tale insieme di pixel di training viene infatti calcolata la firma spettrale della classe ed è quindi importante che questi pixel campione abbiano le caratteristiche di omogeneità, completezza e rappresentatività.

Nella pratica operativa dei software di Telerilevamento esistono molteplici tipologie di algoritmi, chiamati classificatori, ognuno dei quali opera con una metodologia specifica e distintiva, permettendo di raggiungere una migliore o minore qualità della classificazione. Gli algoritmi tipicamente utilizzati, attraverso i quali vengono definiti i criteri di assegnamento dei pixel alle classi d'interesse, sono classificatori di tipo hard o convenzionale. Di seguito sono riportati gli algoritmi di tipo convenzionale più utilizzati per la classificazione delle immagini telerilevate.

- Distanza minima euclidea dalla media: considera solo il valore medio dei pixel di training per ognuna delle classi individuate. Per ogni pixel incognito calcola la distanza euclidea dal vettore medio di ogni classe ed i pixel vengono quindi assegnati alla classe più vicina.
- Distanza minima normalizzata dalla media: considera sia il valore medio sia la deviazione standard di ogni classe. Per l'assegnazione dei pixel incogniti utilizza la distanza euclidea normalizzata rispetto alla deviazione standard, prendendo così in considerazione il grado di dispersione delle diverse classi.
- Metodo del parallelepipedo: costruisce un parallelepipedo di n dimensioni, il cui lato è determinato sulla base dell'ingombro massimo della classe o in funzione della deviazione standard dalla media di ogni classe. Ogni pixel incognito viene assegnato ad una classe se è incluso all'interno del parallelepipedo definito dalla classe stessa.
- Massima verosimiglianza con modello gaussiano: per ogni classe assume una distribuzione normale e considera la posizione del pixel medio, la varianza e la covarianza. Questi parametri definiscono, nello spazio delle caratteristiche, la forma e la posizione dei cluster associati ad ogni classe. Tale algoritmo, per ogni pixel incognito, calcola la probabilità che appartenga ad una determinata classe e lo assegna alla classe con la massima probabilità.
- Distanza angolare degli spettri: è basato sull'analisi della similarità tra uno spettro di riferimento, definito per ciascuna classe, e gli spettri associati ai pixel incogniti e tratta tali spettri come vettori in uno spazio di dimensione n , dove n è pari al numero di bande acquisite. La similarità fra lo spettro di riferimento e quello di ogni pixel viene espressa come distanza angolare tra due vettori nello spazio n – dimensionale. L'algoritmo attribuisce il pixel alla classe rispetto alla quale la distanza angolare è minima.

Per tutte le differenti tipologie di classificatori sopra riportati è possibile impostare dei parametri di soglia per ogni banda considerata. In tal caso, qualora un pixel non verifichi le condizioni imposte dalla soglia, al termine del processo di classificazione risulterà come non classificato.

A seguito di ogni processo di classificazione, sono inevitabilmente presenti degli errori riguardanti l'assegnazione di un pixel ad una classe differente da quella cui appartiene nel riferimento assunto come verità. Una volta generate, le mappe tematiche risultanti dal procedimento di classificazione devono essere quindi sottoposte ad una valutazione statistica di accuratezza: è necessario infatti stabilire quanto la mappa tematica ottenuta sia concorde con un riferimento di verità a terra. Tale valutazione di accuratezza viene realizzata mediante il confronto fra due mappe tematiche, una derivata dalla classificazione dei dati telerilevati e l'altra che costituisce il riferimento rispetto al quale eseguire la comparazione.

4. Dati e materiali utilizzati

I dati di partenza utilizzati per la realizzazione di questo elaborato sono essenzialmente costituiti da:

- immagini satellitari Landsat 5, Landsat 7 ed ASTER,
- modello digitale di elevazione su scala quasi globale SRTM,
- cartografie generali con dettaglio dei principali sistemi di faglie sismiche.

4.1 Le missioni Landsat

Il programma Landsat consiste in una serie di missioni di osservazione satellitare della Terra gestite congiuntamente dalla NASA, National Aeronautics and Space Administration e dalla USGS, United States Geological Survey. Il programma Landsat è stato il primo programma di telerilevamento civile avente l'obiettivo primario di garantire regolarmente una collezione di immagini calibrate della Terra. Dal 1972 i satelliti Landsat hanno costantemente raccolto ed archiviato fotografie digitali della Terra permettendo di monitorare e studiare numerose e differenti problematiche. Questo archivio di dati senza precedenti ha permesso di ottenere informazioni sulla Terra dallo spazio valutando i cambiamenti del paesaggio terrestre, causati sia dai processi naturali sia da quelli antropici.

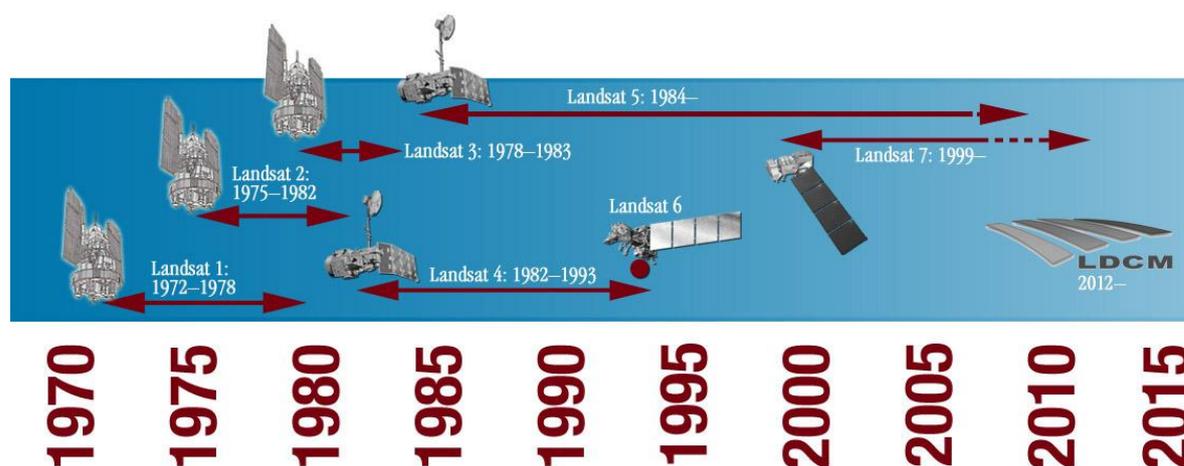


Figura 16. Cronologia delle missioni Landsat

I sensori Landsat sono caratterizzati da una moderata risoluzione spaziale, in quanto in un'immagine Landsat non sono distinguibili, ad esempio, singole case, ma si possono vedere grandi infrastrutture costruite dall'uomo, quali ad esempio le autostrade. Tuttavia la risoluzione spaziale è abbastanza

elevata da permettere una copertura globale e sufficientemente dettagliata per caratterizzare a scala umana processi quali la crescita e l'espansione urbana.

Attualmente sono ancora operativi soltanto i satelliti Landsat 5 e 7, appartenenti rispettivamente alla seconda ed alla terza serie Landsat.

Si descrivono ora le principali caratteristiche comuni ai satelliti Landsat 5 e Landsat 7, per poi analizzare nel dettaglio le caratteristiche specifiche e distintive di ciascuno.

Le caratteristiche comuni ad entrambe le due piattaforme sono:

- Altitudine: 705 km
- Inclinazione: 98.2°
- Orbita: quasi polare, eliosincrona
- Periodo di rivoluzione orbitale: 98.9 minuti, circa 14.5 orbite/giorno
- Ripetitività temporale: 16 giorni
- Sistema di acquisizione: whiskbroom, scanner satellitare across – track
- Larghezza della strisciata: 185 km
- Dimensioni della scena: 170 km N – S e 183 km E – W

Le immagini acquisite dai due satelliti Landsat possono essere classificate sulla base dei livelli di correzione a cui vengono sottoposte.

Tutte le immagini Landsat utilizzate nelle varie elaborazioni sono state processate con la Standard Terrain Correction, L1T – precision and terrain correction: vengono utilizzati punti di controllo a terra e dati di elevazione necessari per effettuare tali correzioni. Il livello di processamento L1T fornisce quindi alle immagini una metodica correzione radiometrica e geometrica ricorrendo a specifici punti di controllo a terra e ad un DEM per l'accuratezza topografica.

4.1.1 Il satellite Landsat 5

- Data di lancio: 1 Marzo 1984
- Sensori: TM (Thematic Mapper) ed MSS (MultiSpectral Scanner)
- Stato: TM ancora attivo, strumentazione MSS disconnessa

Il sensore TM è un radiometro multispettrale che acquisisce su 7 bande spettrali, le cui caratteristiche sono riportate nella tabella sottostante.

Bande	Bande spettrali	Risoluzione	Utilizzi principali
1	0,45 - 0,52 μm	30 m x 30 m	Studio delle aree costiere, batimetrie e distinzione fra suoli e vegetazione
2	0,52 - 0,60 μm	30 m x 30 m	Analisi dello stato di salute della vegetazione attraverso il suo contenuto in clorofilla.
3	0,63 - 0,69 μm	30 m x 30 m	Distinzione di classi di vegetazione
4	0,76 - 0,90	30 m x 30 m	Evoluzione della biomassa fogliare della vegetazione e della linea di costa
5	1,55 - 1,75 μm	30 m x 30 m	Distinzione fra neve e nuvole, contenuto di umidità nei suoli e nella vegetazione
6	10,4 - 12,5 μm	120 x 120 m	Studio della temperatura, mappatura termica ed umidità nei suoli
7	2,08 - 2,35 μm	30 m x 30 m	Discriminazione litologica

Tabella 1. Bande spettrali acquisite dal sensore Landsat TM, con indicazione delle principali applicazioni

4.1.2 Il satellite Landsat 7

- Data di lancio: 15 Aprile 1999
- Sensori: ETM+ Enhanced Thematic Mapper Plus
- Stato: operativo nonostante il guasto del SLC (Scan Line Corrector)

Il sensore ETM+ è una versione avanzata e migliorata del precedente scanner TM, dotato, oltre che delle 7 bande multispettrali del suo predecessore, anche di un'ottava banda pancromatica a maggiore risoluzione.

Bande	Bande spettrali	Risoluzione	Utilizzi principali
1	0,45 - 0,515 μm	30 m x 30 m	Studio delle aree costiere, batimetrie e distinzione fra suoli e vegetazione
2	0,525 - 0,605 μm	30 m x 30 m	Analisi dello stato di salute della vegetazione attraverso il suo contenuto in clorofilla.
3	0,63 - 0,69 μm	30 m x 30 m	Distinzione di classi di vegetazione
4	0,75 - 0,90 μm	30 m x 30 m	Evoluzione della biomassa fogliare della vegetazione e della linea di costa
5	1,55 - 1,75 μm	30 m x 30 m	Distinzione fra neve e nuvole, contenuto di umidità nei suoli e nella vegetazione
6	10,4 - 12,5 μm	60 m x 60 m	Studio della temperatura, mappatura termica ed umidità nei suoli
7	2,09 - 2,35 μm	30 m x 30 m	Discriminazione litologica
PAN	0,50 - 0,90 μm	15 m x 15 m	Sharpening di immagini satellitari

Tabella 2. Bande spettrali acquisite dal sensore Landsat ETM+, con indicazione delle principali applicazioni

4.2 Il sensore ASTER

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) è un sensore multispettrale installato su Terra, un satellite lanciato dalla NASA nel 1999. Di seguito si riportano le principali caratteristiche della piattaforma satellitare.

- Altitudine: 705 km
- Inclinazione: 98.2°
- Orbita: quasi polare, eliosincrona
- Periodo di rivoluzione orbitale: 98.9 minuti,
- Ripetività temporale: 16 giorni
- Sistema di acquisizione: pushbroom, scanner satellitare along – track
- Larghezza della strisciata: 60 km

Il sensore ASTER è costituito da tre radiometri, ognuno dei quali opera in una differente regione dello spettro ed è caratterizzato da una differente risoluzione spaziale.

	Bande spettrali	Intervallo spettrale (μm)	Risoluzione spaziale (m)	Livelli di quantizzazione (bit)
VNIR	1	0.52 – 0.60	15	12
	2	0.63 – 0.69		
	3N	0.78 – 0.86		
	3B	0.78 – 0.86		
SWIR	4	1.60 – 1.70	30	12
	5	2.145 – 2.185		
	6	2.185 – 2.225		
	7	2.235 – 2.285		
	8	2.295 – 2.365		
	9	2.360 – 2.430		
TIR	10	8.125 – 8.475	90	12
	11	8.475 – 8.825		
	12	8.925 – 9.275		
	13	10.25 – 10.95		
	14	10.95 – 11.65		

Tabella 3. Numerazione ed intervallo spettrale delle bande acquisite dal sensore ASTER

I prodotti ottenuti vengono classificati in base al livello di pre – processamento subito dalle immagini; in particolare, tutte le immagini ASTER utilizzate appartengono al livello 1B, che comprende le immagini corrette geometricamente (ma non ortorettificate) e radiometricamente.

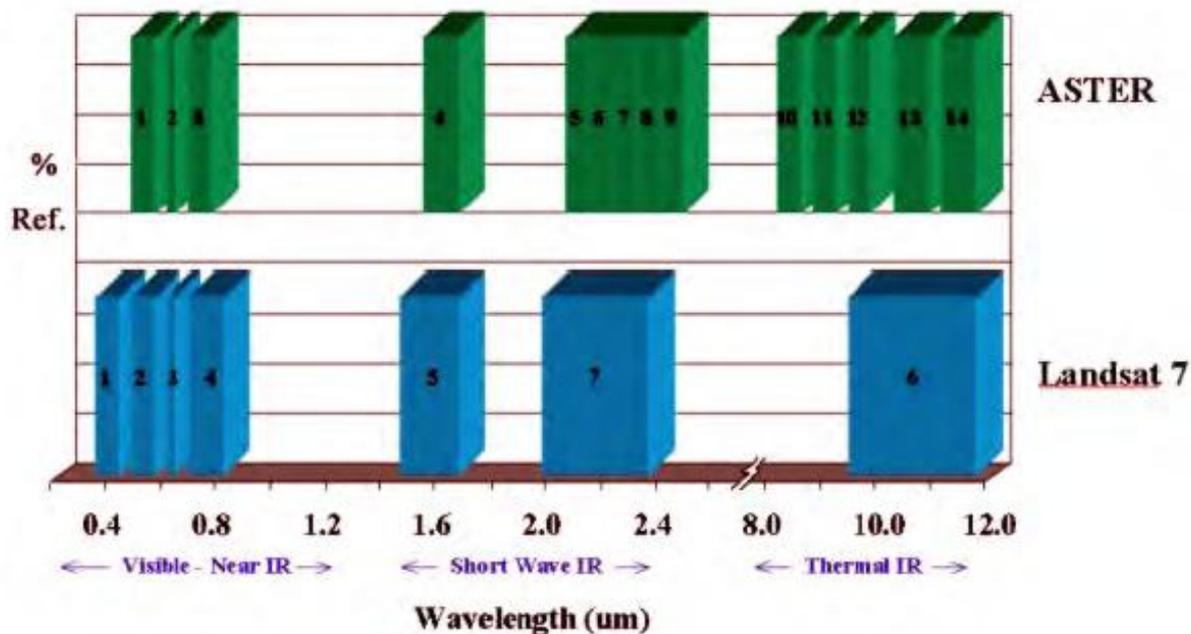


Figura 17. Confronto fra le bande spettrali acquisite dal satellite Landsat 7 e l'ASTER

4.3 II DSM SRTM

Lo Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) è una missione internazionale dedicata all'osservazione della Terra dallo spazio che ha permesso di realizzare un DSM (Digital Surface Model) su quasi tutta la superficie emersa della Terra. Un DSM, o modello digitale della superficie, permette di descrivere la superficie fisica del territorio, compresi edifici e tutto quello che insiste sul terreno.

La missione SRTM, per la raccolta dei dati di elevazione, ha utilizzato due antenne radar opportunamente modificate, installate a bordo dello Space Shuttle Endeavour ed è durata 11 giorni nel periodo 11 – 22 Febbraio del 2000.

Il DSM SRTM è un modello su scala quasi globale che copre le aree comprese fra 60°N e 58°S di latitudine (corrispondenti ad oltre l'80% dell'intero globo, in cui non sono incluse l'Australia e le isole) e costituisce il database topografico digitale ad alta risoluzione più completo.

I file DSM SRTM sono stati mosaicati ed organizzati secondo una griglia regolare costituita da celle di taglio geografico quadrato di 5° per 5° nel sistema di coordinate geografiche (longitudine Est, latitudine Nord, altitudine) riferite al Datum geodetico WGS84 (World Geodetic System 1984).

Per quanto riguarda l'area in esame il processamento dei dati raccolti ha permesso di generare un modello di elevazione avente una risoluzione spaziale dei pixel al suolo pari a 3 archi di secondo, corrispondente a circa 90 m.

L'accuratezza del DSM rispetta ampiamente i limiti previsti in fase di progettazione, ossia entro 20 m di errore orizzontale e 16 m in verticale (nel 90% dei casi) (Rodriguez et al., 2005) con un errore medio verticale di 3,6 m a scala globale (Berry et al., 2007).

Si ritiene opportuno fare la seguente precisazione: a livello teorico si tratta di un DSM e non di un DTM (Digital Terrain Model) in quanto le quote sono relative non al terreno, ma alla superficie riflettente il segnale radar. A livello pratico, però, avendo una risoluzione spaziale del pixel a terra molto elevata, in quanto pari a circa 90 m, la distinzione fra DSM e DTM diventa molto labile, perdendo quasi di significato.

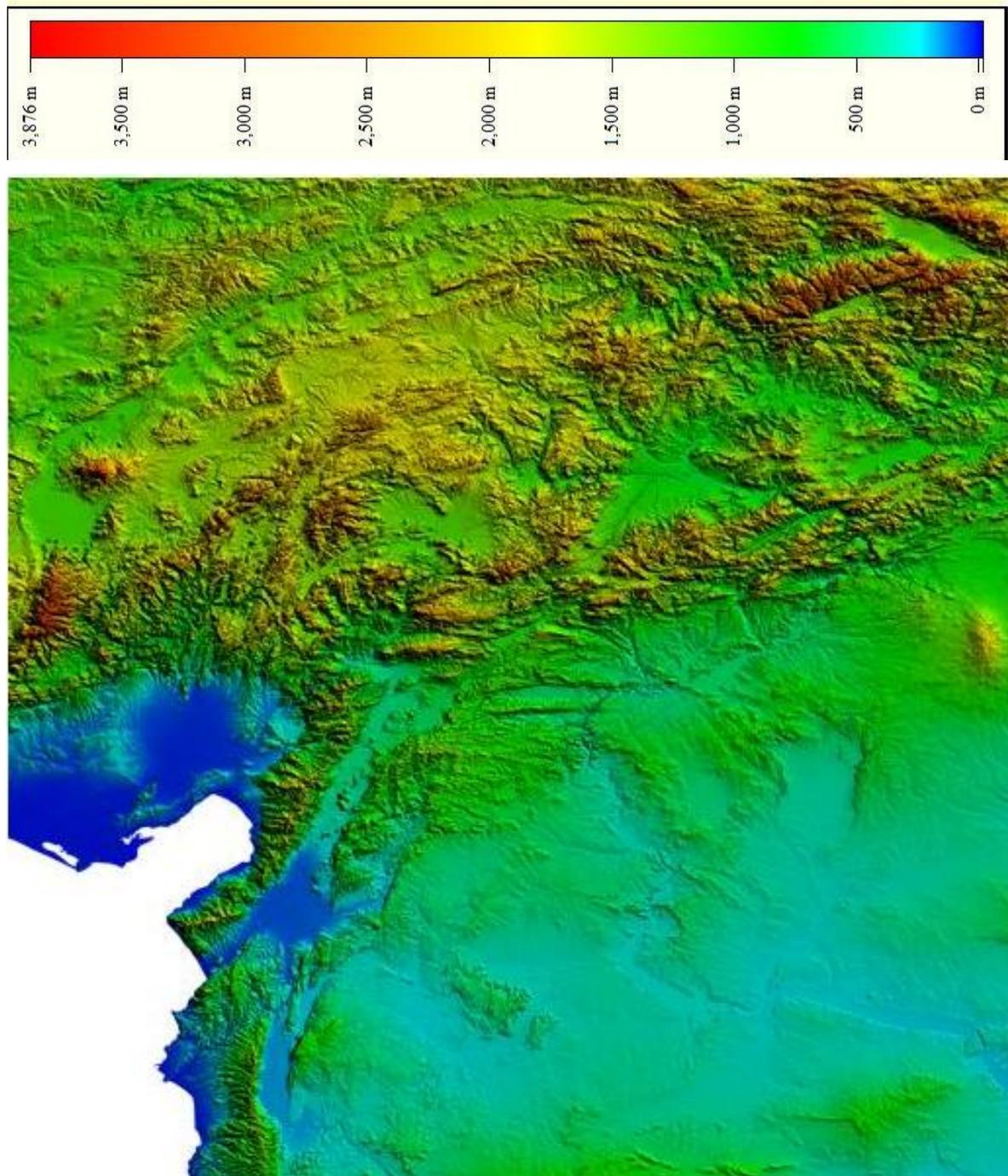


Figura 18. Visualizzazione del DSM SRTM

Non sono attualmente disponibili per l'area di studio dati ad un maggiore livello di precisione e di dettaglio e questo ha influito sia sulle modalità operative sia sui risultati ottenuti.

5. Software utilizzati

Tutte le analisi e molte delle elaborazioni svolte sulle immagini per l'estrazione di informazioni sono state eseguite attraverso l'utilizzo del software commerciale ENVI, orientato all'elaborazione ed all'analisi delle immagini telerilevate.

ENVI corrisponde all'acronimo di "ENvironment for Visualizing Images" ed è un'applicazione software prodotta e commercializzata da ITT Visual Information Solutions, comunemente utilizzata nella disciplina del Telerilevamento per processare ed analizzare le immagini geospaziali.

ENVI è un software che opera su immagini satellitari pancromatiche, multispettrali, iperspettrali e radar, consentendo la loro visualizzazione ed elaborazione a livelli di grigio, a colori o in falso colore, permettendo di lavorare sia con file in formato raster che vettoriale.

ENVI è un pacchetto che offre un'interfaccia caratterizzata da numerose funzioni, suddivise in differenti menù principali, attraverso le quali è possibile eseguire le operazioni necessarie alla gestione ed all'interpretazione delle immagini telerilevate.

Attraverso la barra di navigazione del software è possibile accedere agli specifici menù contestuali che permettono all'utente di conseguire avanzati processamenti d'immagine al fine di estrarne le informazioni più significative ed importanti.

Tutte le soluzioni ENVI sono costruite su IDL, un linguaggio di programmazione sviluppato da ITT, che permette utili e molteplici personalizzazioni, al fine di raggiungere gli scopi specifici dell'utente.

Per la digitalizzazione delle foglie e per la visualizzazione del modello 3D si è utilizzata l'applicazione Global Mapper, un software cartografico per la gestione dei dati territoriali che permette l'accesso ai dati altimetrici ed alle immagini a colori ad alta risoluzione di tutto il mondo, applicando ad essi funzioni GIS.

Global Mapper opera contemporaneamente su dati altimetrici e vettoriali di qualsiasi tipo, fondendoli tra loro, ed integrandoli contestualmente con i formati raster più diffusi.

Global Mapper, consente l'accesso diretto e contemporaneo ad immagini, mappe topografiche e dati altimetrici del terreno in formato griglia e, tracciando anche le posizioni localizzate da GPS, permette di utilizzare numerose funzionalità GIS.

A causa dell'assenza delle informazioni di verità a terra si è dovuto ricorrere all'utilizzo delle immagini ad alta risoluzione fornite dall'applicazione Google Earth, al fine di effettuare verifiche interpretative e comparative con le immagini satellitari a disposizione.

Google Earth è un software che genera immagini virtuali della Terra utilizzando immagini satellitari, fotografie aeree e dati topografici memorizzati in una piattaforma GIS. Google Earth è un'applicazione grafica tridimensionale poiché rimappa sulla superficie tridimensionale della terra le fotografie scattate dai satelliti, in modo tale da riprodurre i rilievi montuosi nella maniera più realistica possibile. E' un software che mostra la Terra vista dal satellite con un livello di dettaglio molto elevato: le fotografie satellitari, inizialmente piatte, vengono modellate in un modello 3D che è possibile apprezzare non appena si modifica l'angolo di visuale. La gran parte delle immagini delle aree terrestri hanno una risoluzione di circa 15 metri per ogni pixel e nelle principali città del pianeta il programma è in grado di mostrare immagini con una risoluzione spaziale inferiore al metro quadrato.

Per quanto riguarda l'area oggetto di studio, la maggior parte delle immagini disponibili in Google Earth è stata acquisita in un periodo recente, fra il 2009 ed il 2011, ma sono tuttavia presenti anche immagini molto meno "aggiornate", risalenti al 2004. Inoltre, parte dell'area in esame è coperta da immagini acquisite attraverso GeoEye – 1, un satellite per Telerilevamento di tipo commerciale ad altissima risoluzione, lanciato in orbita nel settembre 2008 ed in grado di acquisire immagini con una risoluzione di 41cm in modalità pancromatica e di 1.65 m per le immagini multispettrali (con 4 bande: blu, verde, rosso e infrarosso vicino).

6. Principali caratteristiche del sito in esame

La Siria è uno Stato del Medio Oriente, situato nella parte settentrionale della penisola araba e delimitato a nord dalla Turchia, ad est dall'Iraq, a sud dalla Giordania, a ovest da Israele e Libano; ha una superficie totale di 185.180 km² e si affaccia sul quadrante meridionale – orientale del Mar Mediterraneo per circa 180 km.

Gli aspetti del territorio che si intendono prendere in considerazione, in questo elaborato, possono essere distinti in due grandi famiglie:

- ✓ le caratteristiche geomorfologiche ed i principali usi del suolo;
- ✓ le caratteristiche tettonico – sismologiche.

6.1 Caratteristiche geomorfologiche e principali usi del suolo

La regione presa in esame in questo elaborato, corrispondente alla Siria interna settentrionale, dal punto di vista morfologico risulta caratterizzata dalle seguenti unità principali:

- un sistema di catene montuose che si snodano parallelamente alla costa, la cui vetta massima è rappresentata dal Monte Aqraa (1709 m);
- una depressione centrale costituita dalla vallata del Ghab;
- un altopiano semiarido.

La vallata del Ghab, compresa fra le catene montuose che la dividono dal mare e l'altopiano centrale, costituisce il lembo siriano della fossa tettonica levantino – africana, che forma l'enorme depressione causata dalla separazione fra la placca araba e quella africana.

Una fossa tettonica, o valle di rift, rappresenta un'area di sprofondamento naturale della crosta terrestre prodotta da un sistema di faglie dirette, generate da dislocazioni dovute a forze tettoniche distensive su larga scala; gli elementi in rilievo che separano una o più fosse tettoniche affiancate vengono definiti pilastri tettonici. Le fosse tettoniche sono quindi lunghe e strette depressioni lineari della crosta terrestre prodotte da due sistemi di faglie distensive; essendo delle naturali depressioni strutturali, divengono spesso sede di importanti fiumi o laghi.

Il più grandioso insieme di fosse e pilastri tettonici conosciuto in letteratura è proprio quello che, partendo dalla Siria, giunge fino quasi all'Africa Australe attraverso la depressione del Mar Morto in

Palestina, il golfo di Aqaba e di Suez, il Mar Rosso, la depressione dancale in Etiopia e le valli di rift occupate dai grandi laghi equatoriali.

La valle del Ghab è attraversata dal fiume Oronte, il cui corso naturale risulta interrotto dalla presenza di numerose dighe; essendo intensamente sfruttato per l'irrigazione, ha permesso di trasformare quest'area in una delle zone più importanti per l'agricoltura della Siria. Oltre alla già citata valle del Ghab le maggiori aree coltivate siriane sono situate nella valle dell'Eufrate nell'arco settentrionale della Nazione.

Circa un terzo della superficie territoriale del paese è occupata da terreni coltivabili, di cui meno del 5% è effettivamente impiegato per l'agricoltura, con la semina di colture permanenti, mentre circa il 25% è destinato a coltivazioni a rotazione. Tra le colture principali si distinguono: frumento, orzo, mais, barbabietola da zucchero, olivo, cotone, tabacco ed i prodotti della frutticoltura.

Ad est della pianura si sviluppa un sistema di rilievi interni di modesta altitudine, con quote raramente superiori ai 500 m, prevalentemente calcarei, oltre il quale si estende un altopiano semiarido, in gran parte stepposo, con vegetazione sparsa, per lo più sfruttato a pascolo e nel quale scorre a nord – est l'Eufrate.

Questa distinzione geomorfologica ed i relativi usi del suolo è anche riscontrabile dalle analisi climatiche. Nella regione in esame possono infatti distinguersi le due seguenti zone climatiche:

- l'area costiera, caratterizzata da un clima umido e temperato, tipicamente mediterraneo; le precipitazioni ammontano in media a circa 750 mm/anno, ma superano i 1.250 mm nelle catene montuose a ridosso della costa
- la zona stepposa, caratterizzata da frequenti periodi di gelo ed escursioni termiche elevate; le precipitazioni sono meno consistenti, comprese fra 300 – 600 mm/anno e concentrate quasi esclusivamente nei mesi invernali e primaverili.

6.2 Caratteristiche tettonico – sismologiche

Per poter caratterizzare nella maniera più corretta e completa possibile il comportamento sismologico della Siria interna settentrionale, è necessario considerare la regione definita da 32° a 38° di latitudine nord e da 35° a 39° di longitudine est, comprendente la Turchia orientale – meridionale, la Siria occidentale ed il Libano.

Sulla base della teoria della tettonica delle placche, la superficie terrestre risulta costituita da un guscio litosferico suddiviso in un numero limitato di porzioni rigide, dette placche litosferiche, in movimento reciproco fra loro; l'attività tettonica e sismica viene spiegata come una conseguenza dell'interazione fra queste diverse placche litosferiche rigide.

La Siria appartiene alla placca araba, o arabica, che corrisponde prevalentemente alla penisola araba, e si estende verso nord in direzione della Turchia.

La formazione delle principali linee di fagliazione che hanno prodotto la separazione per rifting della penisola araba dal continente africano e la conseguente formazione del Mar Rosso risale all'epoca Oligocenica, circa 30 milioni di anni fa; da allora la placca araba è in movimento verso nord, in collisione con l'Eurasia. A questa collisione, lungo un asse N – S, a partire dal Miocene, circa 15 milioni di anni fa, è attribuita la formazione della microplacca anatolica.

Questo sistema deformativo, infatti, ha prodotto l'estrusione verso ovest di una microplacca di neoformazione, la placca anatolica appunto, e si sono originate le faglie Nord ed Est anatoliche, tutt'ora fra le principali responsabili della deformazione e del movimento che interessa tale area: lungo tali faglie, infatti, si propaga il movimento verso ovest della microplacca anatolica (Sengör e Canitez, 1982).

A seguito della sua complessa storia tettonica, la regione esaminata nel presente elaborato risulta interessata da due zone di faglia principali:

- ✓ la faglia Est anatolica, EAF (East Anatolian Fault);
- ✓ il sistema di faglia del Mar Morto, DSFS (Dead Sea Fault System).

Entrambi questi sistemi rappresentano faglie trascorrenti (strike – slip) sinistre: il movimento relativo avviene parallelamente alla direzione del piano di faglia ed il blocco situato dall'altra parte della faglia risulta spostato a sinistra.

La faglia Est anatolica è una grande struttura geologica con movimento sinistrorso, lungo la quale si propaga il movimento verso Ovest della microplacca anatolica, con orientamento NE – SW e costituisce il confine tettonico trasforme fra la placca anatolica e quella araba, in movimento verso nord. E' stato osservato che la faglia Est anatolica, verso SW, perde la sua definizione e sfuma nel golfo di Iskenderun, ove è evidente una zona particolarmente fagliata (McKeinze, 1978). Sulla base di questa documentazione è stato inoltre ipotizzato che la faglia Est anatolica sia congiunta verso SW con la terminazione occidentale dell'arco di Cipro, anche se non si hanno ancora prove sufficienti per evidenziare tale collegamento (Jackson e McKeinze, 1984).

Nella zona di faglia dell'Anatolia Orientale si osserva la maggior parte della deformazione attiva fra le placche araba ed anatolica; la “fuga” tettonica della microplacca anatolica si sta svolgendo verso ovest e lo scorrimento lungo la EAF è stato calcolato, attraverso misure GPS, in 8 – 10 mm/anno (Emre O, Duman T.Y, 2007).

Il sistema di faglia del Mar Morto costituisce uno dei maggiori complessi di faglie continentali trascorrenti al mondo e rappresenta una caratteristica tettonica fondamentale nella regione del Mediterraneo Orientale, dominata dalla collisione delle placche araba ed africana con l'Eurasia. Come

anticipato, questa struttura si è formata all'interno di questo contesto tettonico a seguito del distacco della placca araba da quella africana. Il sistema di faglia laterale – sinistro del Mar Morto forma all'incirca 1000 km di faglia continentale trasforme che si estende lungo una direzione all'incirca N – S a partire dalla terminazione meridionale della faglia Est anatolica, in corrispondenza della zona di collisione con la Turchia meridionale, fino al Mar Rosso.

Lungo l'estensione più settentrionale del sistema di faglia trasforme del Mar Morto, nota come faglia sirio – libanese o SLF (Syrian Lebanese Fault), le variazioni della direzione di spostamento che si sono succedute hanno prodotto, dal Miocene ad oggi, una serie di strutture compressive; tale porzione risulta attualmente costituita dall'insieme di più strutture, fra le quali le diramazioni di maggior rilievo comprendono le faglie di Yammouneh e di Serghaya in Siria e la faglia di Roum in Libano (Ambraseys e Barazangi, 1989).

Inoltre, vicino al confine settentrionale con il Libano, il sistema di faglia del Mar Morto può essere rintracciato nella zona di faglia Ghab con andamento verso nord.

I modelli della tettonica a placche prevedono che il moto relativo tra l'Arabia e l'Africa sia pari a circa 5 – 10 mm/anno, coerenti con i risultati degli studi sul campo compiuti lungo la DSFS (Garfunkel et al, 1981; Galli, 1999; Klinger et al, 2000). Inoltre, il tasso di deformazione attiva e lo spostamento relativo fra le placche araba ed africana, determinato attraverso differenti studi mediante l'impiego di GPS, è risultato pari a 7,5 mm/anno nella parte settentrionale della faglia (McCluskey et al., 2003).

Nonostante la loro intensa attività tettonica, l'estensione settentrionale del sistema di faglia del Mar Morto e la sua giunzione con la zona di faglia dell'Anatolia Orientale sono state relativamente quiescenti negli ultimi due secoli; limitatamente a questo intervallo temporale, l'attività sismica risulta quindi bassa. Tale dato non rappresenta sicuramente un riferimento affidabile per valutare l'attività sismica su un lungo periodo e non può essere considerato significativo per la classificazione del rischio sismico del territorio siriano.

Numerose documentazioni e cronache storiche riportano infatti il verificarsi di grandi e disastrosi eventi sismici nel passato, concentrati, in particolare, lungo la parte settentrionale del sistema di faglia del Mar Morto, con rotture in terremoti individuali limitati in lunghezza dalle discontinuità strutturali. Sulla base di numerosi studi ed attività di ricerca è possibile affermare che il numero totale di terremoti storici verificatisi in Siria e nei dintorni nel periodo compreso fra il quattordicesimo secolo A.C. ed il diciannovesimo secolo D.C. è pari a 181 (Sbeinati M.R, Darawcheh R, Mouty M, 2005).

Inoltre, le cronache di sismicità storia rivelano il verificarsi di oltre due dozzine di terremoti di magnitudine 7 della scala Richter nelle vicinanze di questo paese del Mediterraneo orientale. La maggior parte della sismicità è concentrata nella Siria occidentale ed è relazionata al sistema di faglia siriano – africano (sistema di faglia trasforme del Mar Morto) (Al-Khoubbi I, Halchuk S, Adams J, 2001).

La maggior parte dei terremoti storici sono di tipo moderato, con magnitudo compresa fra 5 e 6, e sono collocati lungo la faglia EST Anatolica ed il sistema di faglia del Mar Morto, mentre una sismicità inferiore può essere osservata lungo la zona di faglia del Ghab. I meccanismi focali dei principali eventi recenti indicano un trend NNW – SSE con movimenti di spinta e scivolamento lungo le faglie. Questi meccanismi spiegano il modello trascorrente sinistro di deformazione attiva, con una componente minoritaria di fagliamento normale lungo il sistema di faglia del Mar Morto (Sbeinati M.R, 1993).

La sismicità in questa regione è limitata ai 10 – 20 km più superficiali della crosta continentale, mentre la crosta inferiore è generalmente antisismica (Ambraseys N.N, 2004).

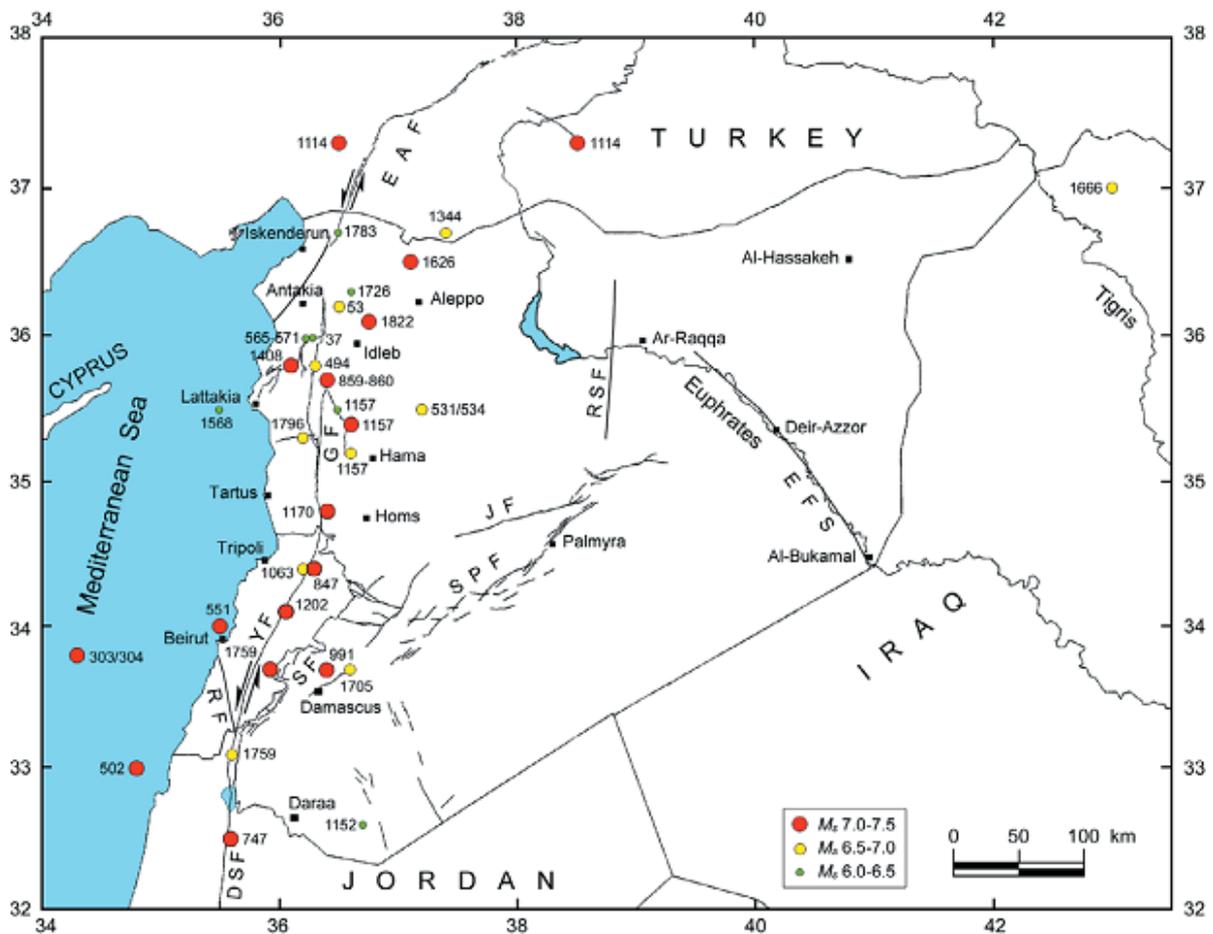


Figura 19. Ubicazione degli epicentri dei terremoti storici più disastrosi in Siria e Libano (le faglie sono compilate da McBride et al., 1990; Barzangi et al., 1993; Gomez et al., 2001)

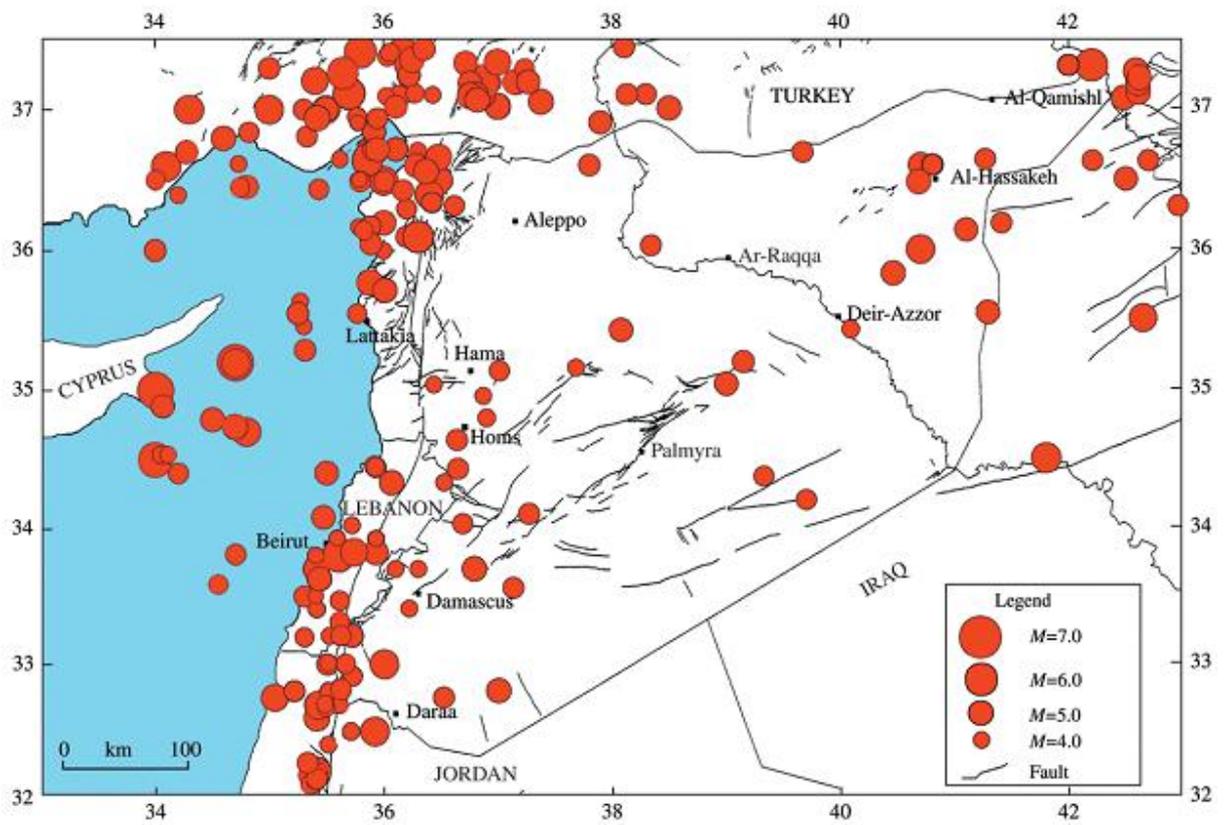
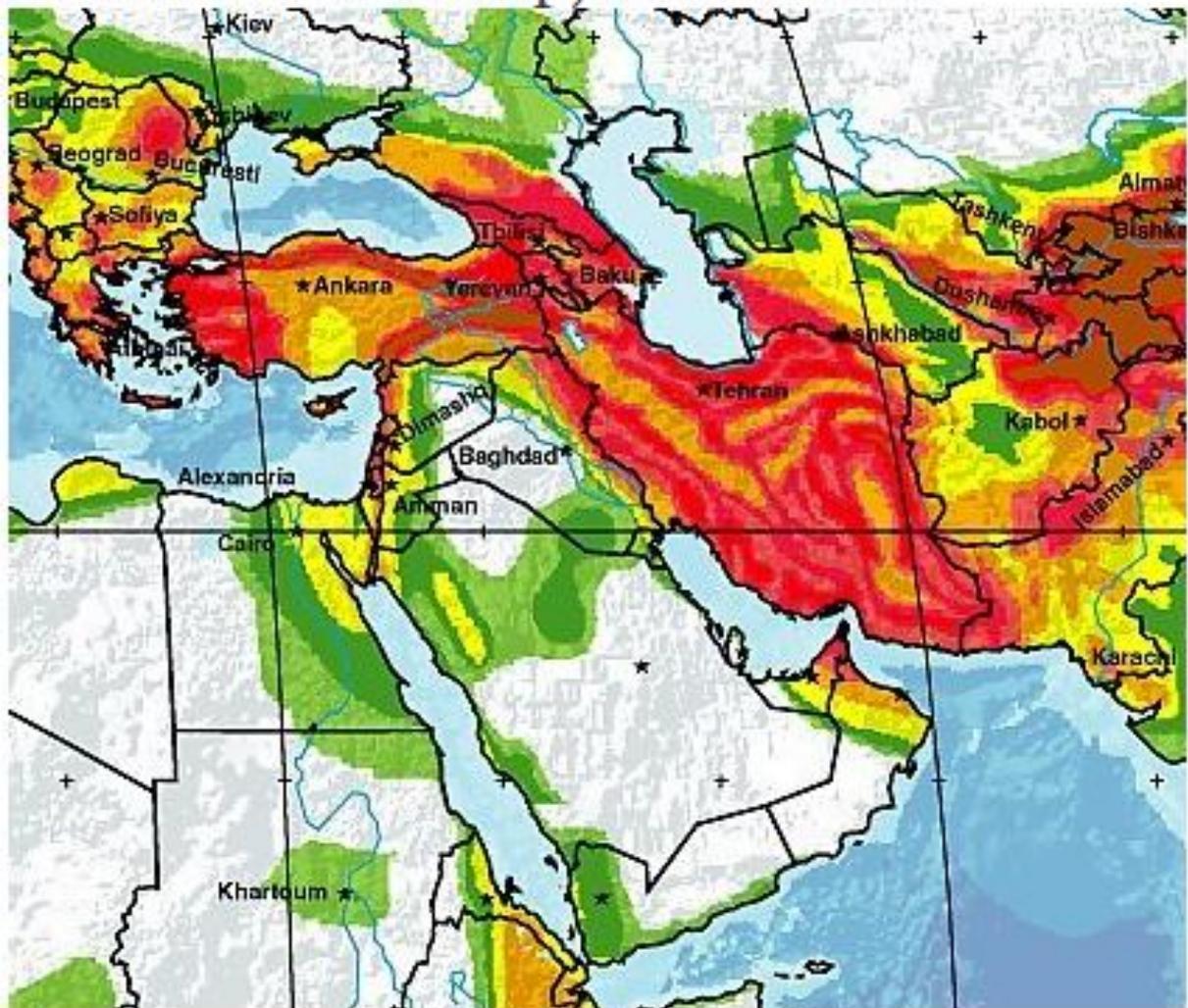


Figura 20. Mappa della sismicità nel periodo 1900 – 1993, dalla quale risulta evidente l'attività e la potenzialità sismogenetica della DSFS settentrionale e centrale (Sbeinati, 1993)

Seismic Hazard Map, Middle East



PEAK GROUND ACCELERATION (m/s^2)

10% PROBABILITY OF EXCEEDANCE IN 50 YEARS, 475-year return period

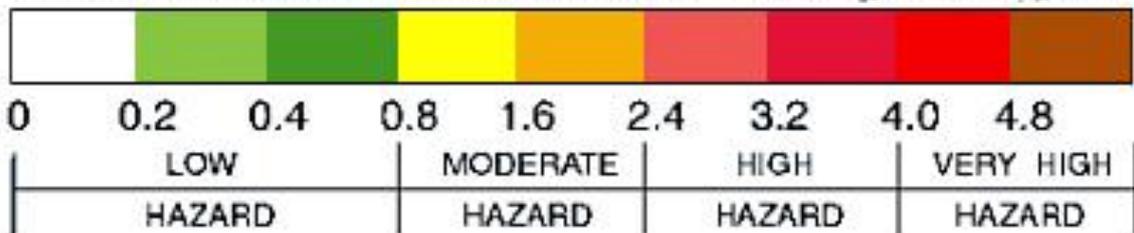
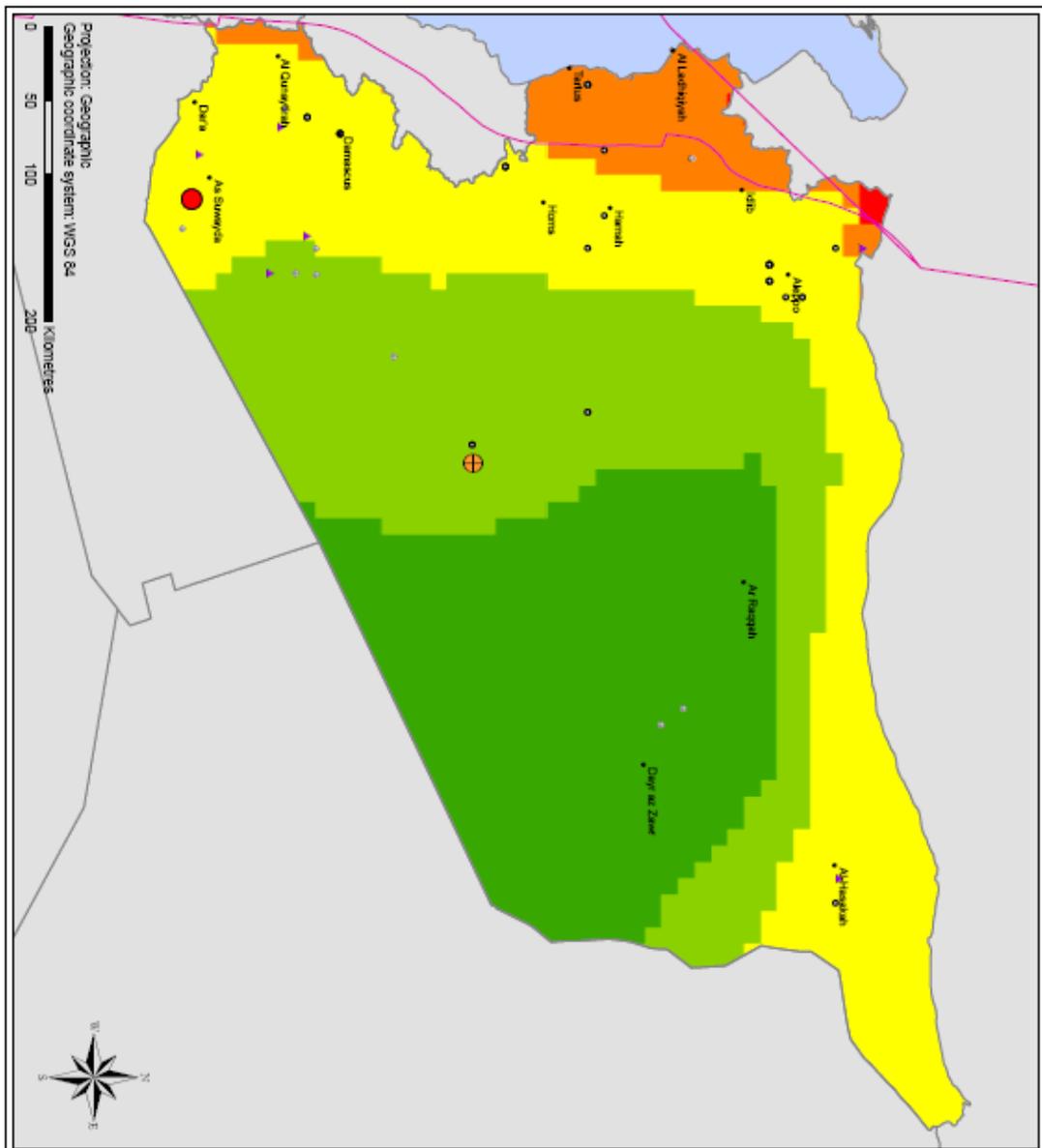


Figura 21. Mappa del rischio sismico nel Medio Oriente prodotta dal Global Seismic Hazard Assessment Program - GSHAP, 1999



Legend

Intensity level
(Adapted from Giardini et al., 1999)

- Very low
- Low
- Medium
- High
- Very high
- No data

Past significant earthquakes
(Dunbar et al., 1994)

Past world stress events
(Reineck et al., 2003)

Reiner Scale Magnitude

- 0.0 or (Maximum (geodesic reinterpolation))
- 0.1 - 1.9 (Little)
- 2.0 - 2.9 (Very minor)
- 3.0 - 3.9 (Minor)
- 4.0 - 4.9 (Light)
- 5.0 - 5.9 (Moderate)
- 6.0 - 6.9 (Strong)
- 7.0 - 7.9 (Very strong)
- ≥ 8.0 (Catastrophic)

Plate boundaries
(Dunbar et al., 1994)

International boundaries
(UN, 2007)

Major cities (Dunbar, 1993)

Volcanoes
(Dunbar et al., 1994)

Disclaimer

The boundaries and names shown and the designations used on this map do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the World Health Organization concerning the status of any country, territory, city or area, or of its authorities, or concerning the delimitation of its borders or boundaries. Dotted lines on maps represent approximate border lines for which there may not yet be an agreement.

All reasonable precautions have been taken by WHO to produce this map. However, this map is being distributed without warranty of any kind, either express or implied regarding its content. The responsibility for its interpretation and use lies with the user. In no event shall the World Health Organization be liable for damages arising from its use.

© WHO 2007. All rights reserved.

Contact

Emergency Preparedness & Humanitarian Action
WHO Regional Office for the Eastern Mediterranean
in@emro.who.int

Figura 22. Mappa del rischio sismico per il territorio della Siria

7. Analisi ed elaborazioni effettuate

Inizialmente è stata elaborata un'immagine appartenente alla collezione GLS (Global Land Survey) 2005, acquisita dal satellite Landsat 7 in data 26/06/2007.

Al fine di eseguire la classificazione dell'immagine, come prima operazione è stata effettuata una calibrazione radiometrica della stessa, per poter così passare dai DN ai valori di riflettanza exoatmosferica, ovvero riflettanza sopra l'atmosfera. I valori di riflettanza exoatmosferica sono valori di riflettanza apparente, ottenuti eliminando soltanto l'effetto dell'irradianza solare e della posizione del Sole, non quello relativo all'atmosfera.

Una volta calibrata l'immagine si è realizzato un subset spaziale, definendo un layer vettoriale, per ridefinirne i contorni, al fine di eliminare gli effetti di disturbo inevitabilmente presenti sull'immagine in quanto connessi alla sua acquisizione, e dovuti, in particolare, all'ottica di scansione.

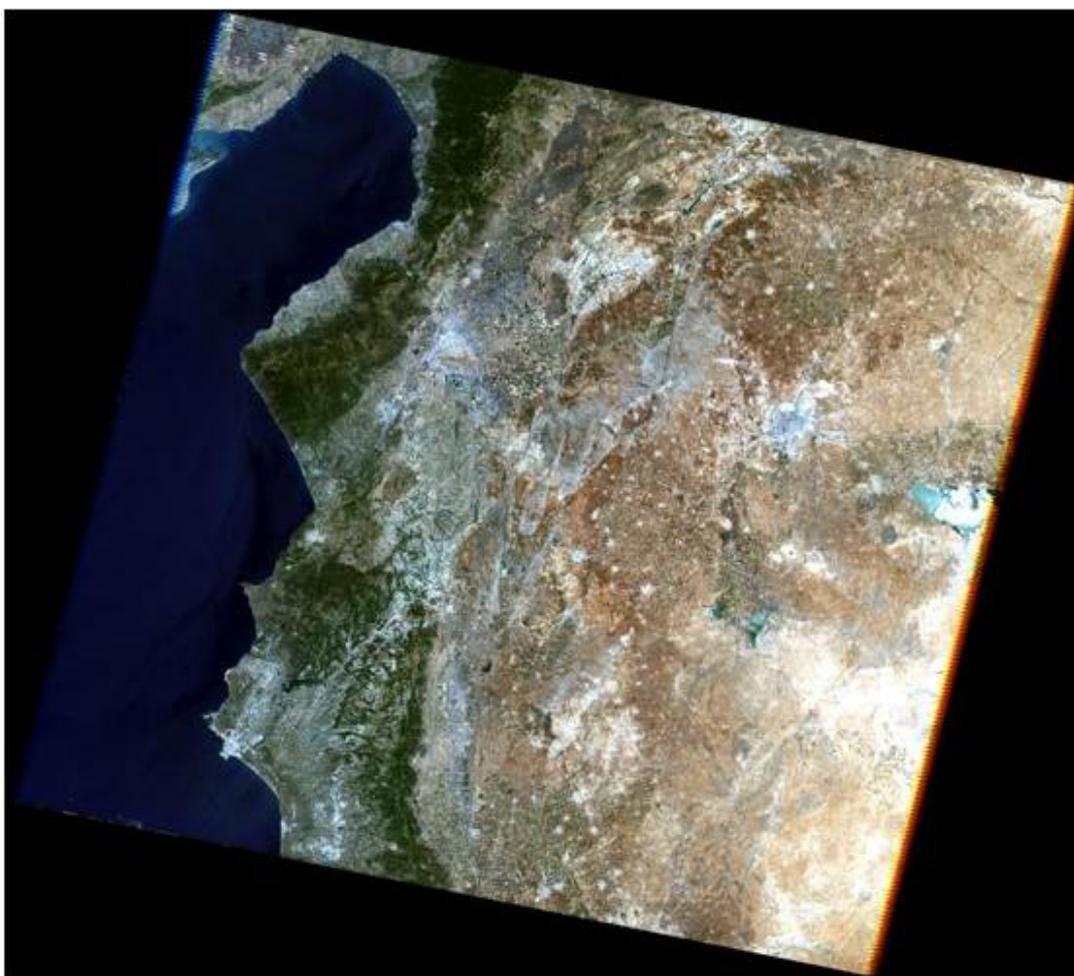


Figura 23. Visualizzazione a colori naturali dell'immagine acquisita dal satellite Landsat 7 in data 26/06/2007

7.1 La calibrazione delle immagini Landsat

Calibrare un'immagine significa convertire i valori dei DN in valori di radianza al sensore, mediante l'inverso della funzione di risposta radiometrica per ogni singolo canale sul quale il sensore esegue la misura, attraverso la relazione: $L_\lambda = f(\text{DN})$.

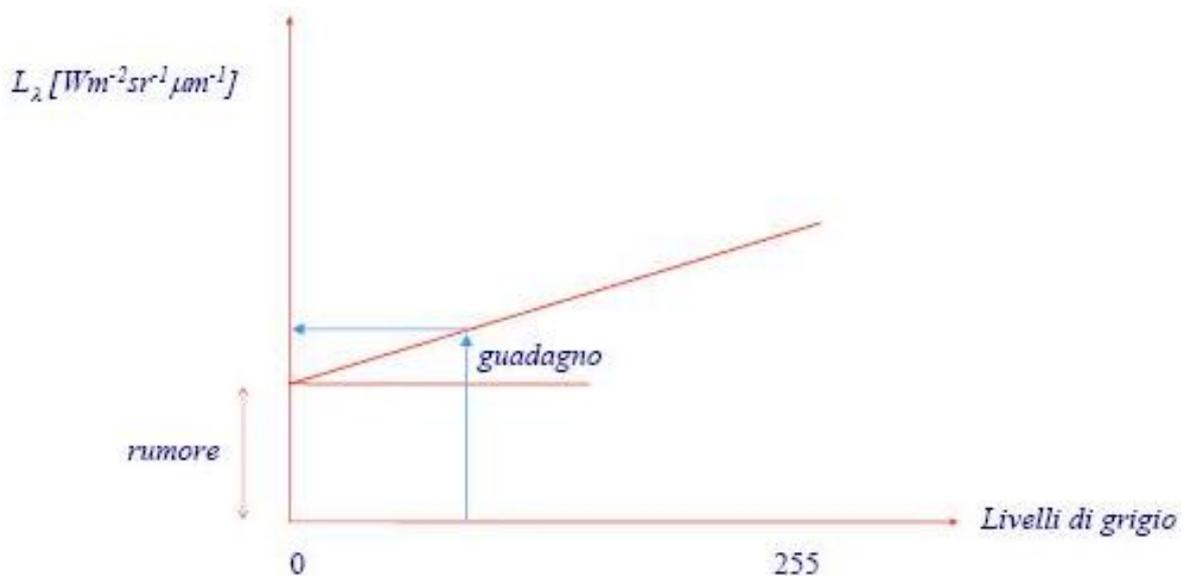


Figura 24. Inverso della funzione di risposta radiometrica per un pixel in una generica banda del sensore Landsat ETM+: dal DN è possibile ottenere un valore di radianza al sensore

Come spiegato nei capitoli precedenti, la conversione $\text{DN} \rightarrow L$ risulta indispensabile per poter confrontare immagini acquisite da sensori diversi o in periodi differenti. Ogni canale sul quale il sensore esegue la misura possiede i propri dati di calibrazione; lo stesso DN, registrato da sensori differenti o dal medesimo sensore nelle diverse bande utilizzate, può fornire valori di radianza differenti. Si precisa che la radianza L deve essere considerata come radianza spettrale L_λ , in quanto le calibrazioni sono riferite al singolo sensore operante in una specifica banda spettrale.

Si possono convertire i valori DN in valori di radianza spettrale assoluti se sono noti dalla calibrazione i valori di radianza minima L_{\min} e massima L_{\max} , per ogni singolo canale, attraverso la relazione:

$$L_\lambda = L_{\lambda \min} + \frac{L_{\lambda \max} - L_{\lambda \min}}{DN_{\max}} DN$$

DN = valore espresso in DN del generico pixel dell'immagine

DN_{max} = valore massimo della radianza espresso in DN, per Landsat pari a 255.

L_{λ} = radianza spettrale originale della ripresa

$L_{\lambda_{min}}$ = radianza spettrale a cui corrisponde $DN = 1$ (dato di calibrazione strumentale)

$L_{\lambda_{max}}$ = radianza spettrale minima per la quale $DN = DN_{max}$, ossia il canale saturo

$L_{max} - L_{min}$ = range dinamico del canale

I valori numerici DN presenti nelle immagini digitali possono quindi fornire i valori di radianza originale rilevata per mezzo della funzione di calibrazione sopra riportata, permettendo così di passare dallo "spazio DN" allo "spazio radianza".

7.1.1 La calibrazione delle immagini Landsat in ENVI

Il software ENVI contiene un apposito modulo dedicato alla calibrazione radiometrica delle immagini acquisite dalle differenti tipologie di sensori maggiormente utilizzati nell'ambito del Telerilevamento. Attraverso l'applicazione "Landsat Calibration" il software converte i valori di DN delle immagini Landsat TM ed ETM+ in valori di radianza al sensore o di riflettanza exoatmosferica, utilizzando i coefficienti di offset e di guadagno forniti nei metadati.

Nel presente studio, in particolare, si è eseguita la conversione dei DN in valori di riflettanza exoatmosferica.

Il profilo spettrale che si ottiene attraverso tale operazione di calibrazione risulta particolarmente utile per eseguire la classificazione utilizzando come modello di riferimento le firme spettrali delle principali superfici presenti in letteratura.

Si sottolinea che si può parlare di "firma" soltanto se si esegue un'accurata correzione atmosferica; il profilo spettrale è assimilabile alla firma spettrale a meno degli effetti atmosferici non corretti.

Nonostante tali due tipologie di curve spettrali presentino un comportamento parzialmente differente per una medesima superficie, tale scelta rappresenta comunque un vantaggio ai fini della classificazione, in quanto permette di confrontare grandezze omogenee sia dal punto di vista fisico che della scala di rappresentazione.

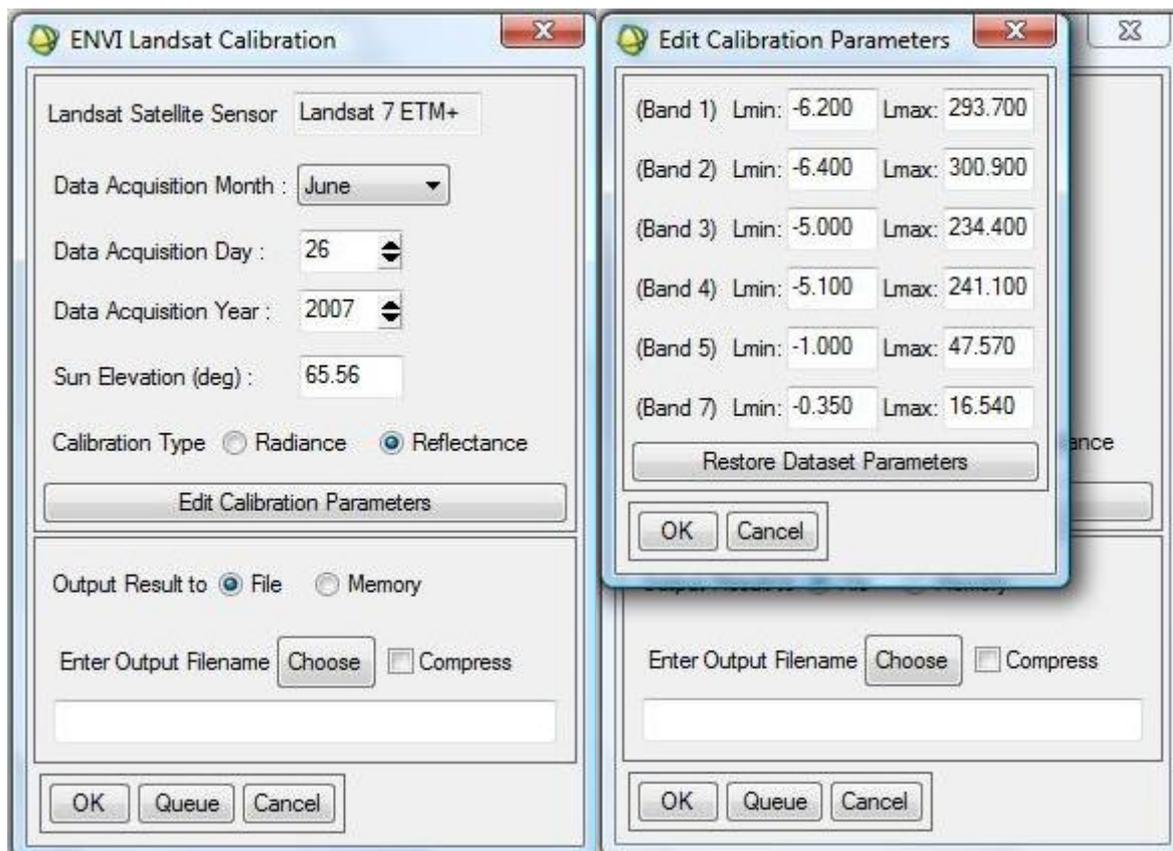


Figura 25. Coefficienti di calibrazione per l'immagine Landsat ETM+ acquisita il 26 giugno 2007



Figura 26. Immagine ritagliata e calibrata radiometricamente, visualizzata a colori naturali

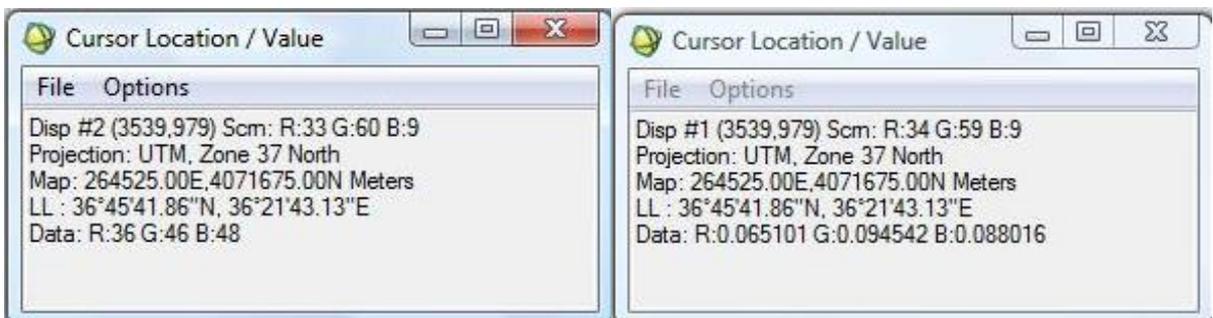


Figura 27. A sinistra i DN di un generico pixel ed a destra i valori di riflettanza exoatmosferica, ottenuti in seguito alla calibrazione radiometrica dell'immagine, per il medesimo pixel

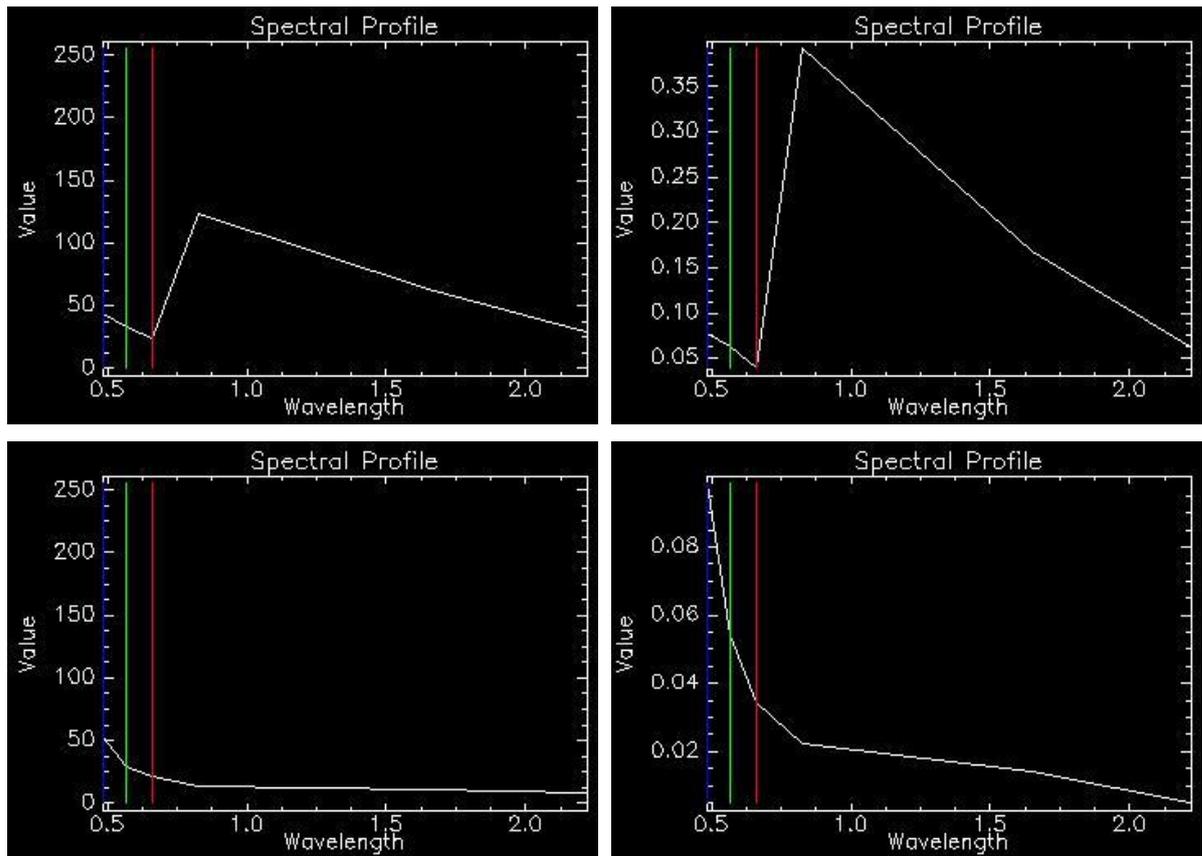


Figura 28. Confronto dei profili spettrali relativi alla vegetazione, in alto ed all'acqua, in basso: a sinistra per l'immagine non calibrata, a destra dopo la calibrazione.

7.2 La classificazione di un'immagine Landsat

Per poter eseguire una classificazione che rappresentasse nella maniera più fedele possibile la realtà del territorio in esame si sono dovute superare notevoli difficoltà operative, dipendenti principalmente da due fattori fortemente limitanti:

- ✓ la mancanza di classificazioni storiche del territorio in esame,
- ✓ l'assenza di dati di verità a terra sui quali poter basare la classificazione.

Non disponendo di dati sulla zona oggetto di studio, da utilizzare come riferimento e base di partenza per la classificazione, la prima operazione compiuta è stata quella di interpretare visivamente l'immagine enfatizzando le caratteristiche dell'area in esame attraverso l'utilizzo di opportune combinazioni fra le diverse bande spettrali a disposizione.

Come in precedenza riportato, infatti, la visualizzazione di un'immagine attraverso l'utilizzo del colore è ottenuta combinando tre immagini acquisite in intervalli spettrali diversi. In particolare, per il riconoscimento delle principali superfici di copertura a terra e per la definizione delle aree di training da utilizzare per l'addestramento dell'algorithm per la classificazione, si sono utilizzate diverse

modalità di visualizzazione a falsi colori dell'immagine. Nella tabella sottostante vengono riportate alcune delle caratteristiche identificabili attraverso le principali visualizzazioni a falsi colori utilizzate, limitatamente all'ambito d'interesse del presente elaborato.

R, G, B	Potenziali informazioni contenute
4, 3, 2	Tipica rappresentazione delle immagini a falsi colori, utile per lo studio della vegetazione e per il monitoraggio delle varie fasi di crescita delle colture. La vegetazione appare in tonalità di rosso, il suolo in una moltitudine di colori, la neve e le nuvole in bianco o ciano chiaro e l'acqua in nero. Tonalità di rosso scuro indicano vegetazione più sana, mentre i rossi più chiari identificano pascoli o aree scarsamente vegetate; alberi di conifere appariranno più scuri rispetto a quelli di latifoglie.
7, 4, 2	La vegetazione appare nei toni del verde, dal più scuro al più chiaro, a seconda dello stato di salute e di crescita fogliare, le zone urbane appaiono in grigio, ciano o viola, mentre le sabbie, i suoli e i minerali appaiono in una varietà di colori, l'acqua è nero o blu scuro. Tonalità di verde dall'oliva al brillante indicano normalmente aree forestate, con le foreste di conifere di un verde più scuro rispetto alle decidue; macchie di verde chiaro all'interno delle città indicano coperture erbose del terreno, come parchi e campi da golf.
4, 5, 3	Con questa combinazione il terreno appare azzurro, la tipologia di vegetazione e le relative condizioni appaiono in una varietà di sfumature: marroni, arancioni e verdi. Utilizzando più bande di infrarossi, questa combinazione mostra anche le differenze di umidità ed è utile per l'analisi delle condizioni del suolo e della vegetazione. In generale, più umido è il terreno, più scuro appare, a causa della capacità di assorbimento nell'infrarosso dell'acqua.
4, 5, 1	In questa combinazione la vegetazione sana appare in tonalità di rossi, marroni, arancioni e gialli. I terreni possono essere in verde e marrone, le caratteristiche urbane sono in bianco, ciano e grigio, le aree blu brillante rappresentano zone recentemente deforestate e le aree rossastre mostrano una nuova crescita della vegetazione.

Tabella 4. Combinazioni a falsi colori RBG utilizzate e principali informazioni ricavabili

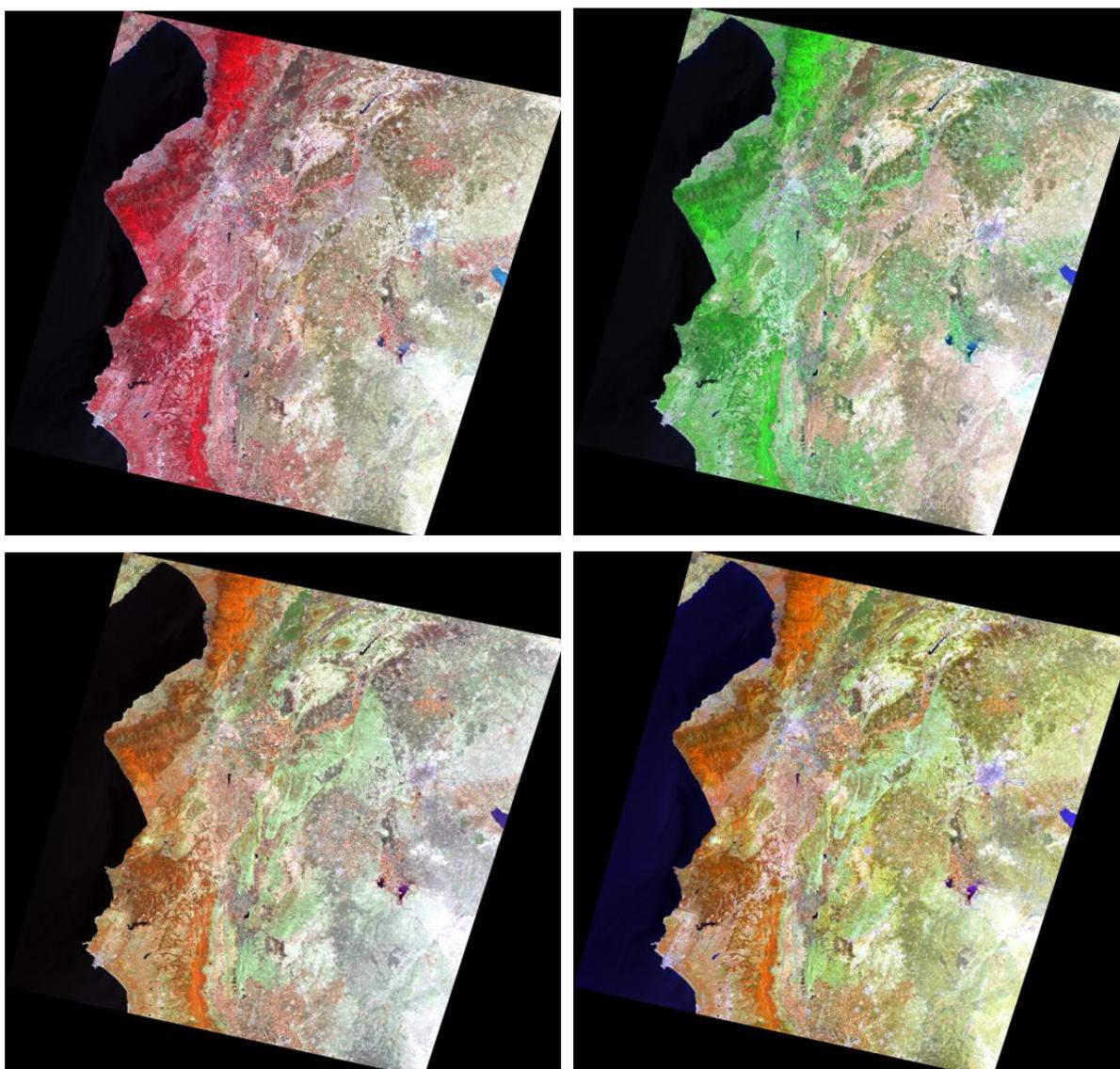


Figura 29. Differenti visualizzazioni dell'immagine a falsi colori RGB: da sinistra, in alto, combinazioni 4,3,2 e 7,4,2, in basso, 4,5,3 e 4,5,1

La definizione delle aree di addestramento e la discriminazione fra le varie coperture presenti nell'immagine è avvenuta mediante il confronto dei profili spettrali, curve di riflettanza in funzione della lunghezza d'onda, che mostrano il comportamento delle superfici investite dalla radiazione nell'intervallo spettrale $0.4 - 2.5\mu\text{m}$. Nella figura sottostante sono riportate le firme spettrali delle principali superfici naturali, mostrando la collocazione degli intervalli di acquisizione del sensore Landsat TM ed ETM+, che acquisiscono rispettivamente 7 e 8 bande spettrali negli intervalli e con le risoluzioni illustrati nei capitoli precedenti.

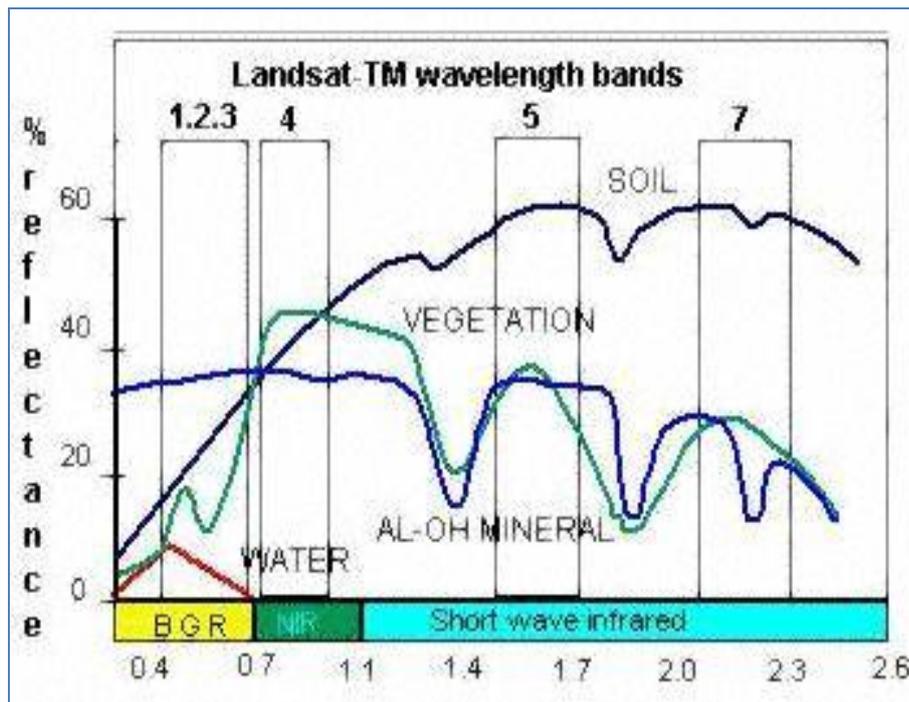


Figura 30. Firme spettrali delle principali superfici con indicazione degli intervalli di acquisizione del sensore Landsat

Il confronto della scena osservata, ottenuto mediante l'analisi delle due combinazioni di immagini 4,3,2 e 7,4,2, ha permesso di definire, in particolare, due differenti tipologie di vegetazione, una più chiara e brillante, l'altra più scura, collocate a ridosso della zona costiera. Sulla base dei dati presenti in letteratura e riportati nella tabella precedente, è stato quindi possibile distinguere fra due specie vegetative: le conifere e le latifoglie; di seguito si riportano i profili spettrali delle due classi così individuate.

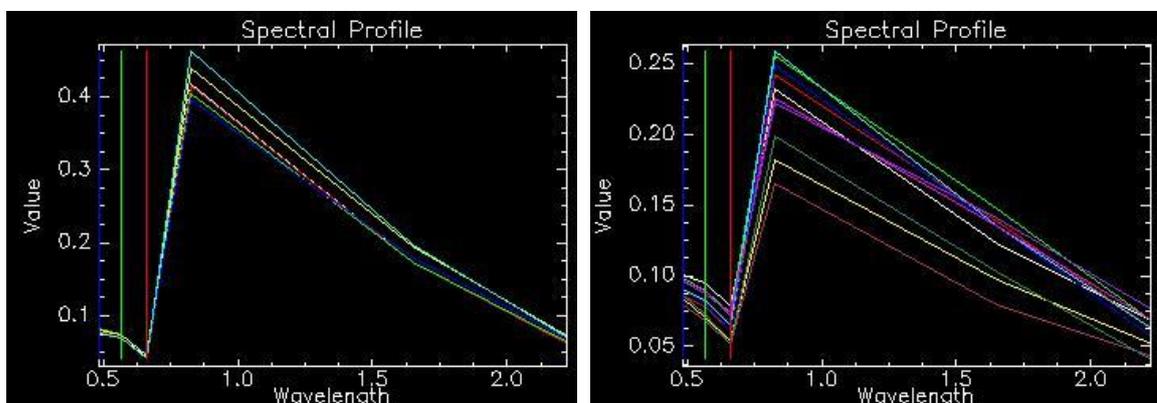


Figura 31. Profili spettrali delle due coperture vegetative: a sinistra le latifoglie, a destra le conifere

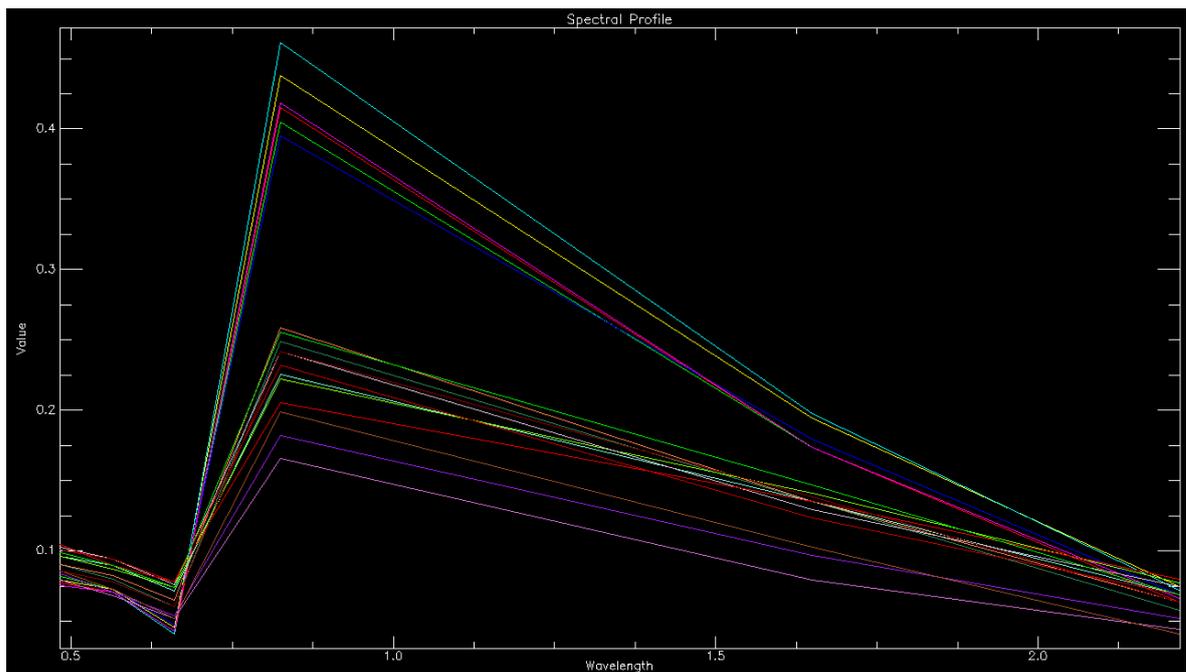


Figura 32. Distinzione fra due specie vegetative presenti: i valori di riflettività più elevati sono associati alle decidue quali le latifoglie, quelli più bassi alle conifere

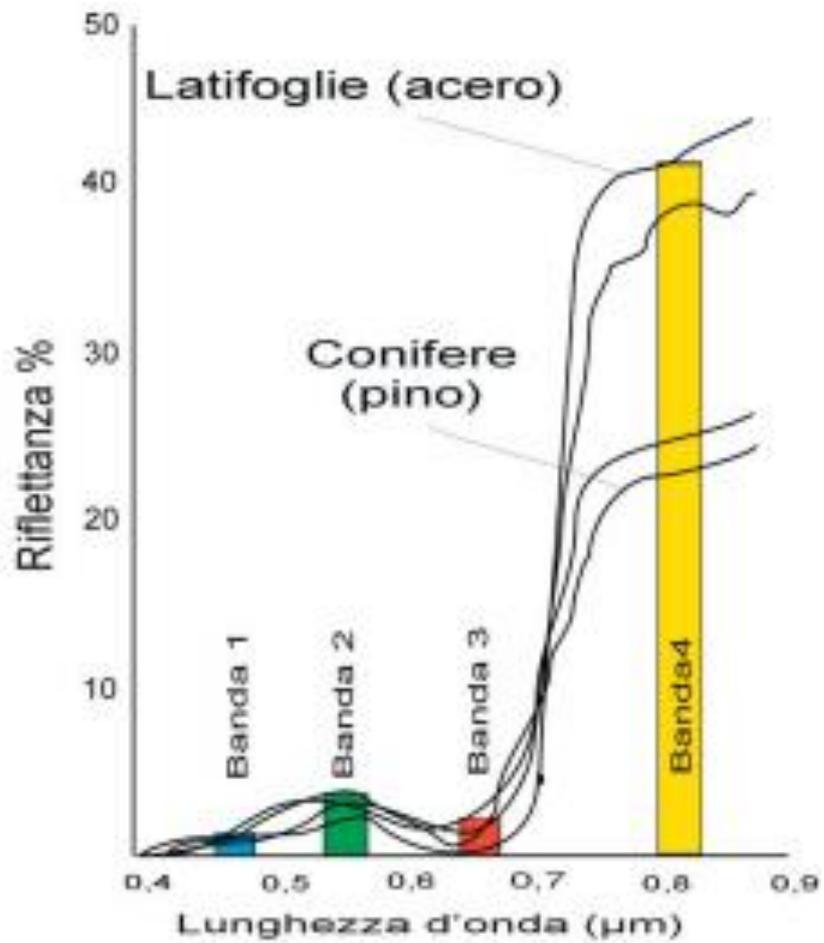


Figura 33. Dettaglio delle firme spettrali delle conifere e delle latifoglie

Come precedentemente evidenziato, il problema principale che si è dovuto affrontare e superare per la generazione di una classificazione dell'area in esame è rappresentato dalla mancanza di dati e di informazioni a terra e dall'assenza di classificazioni storiche.

Oltre all'analisi dell'immagine visualizzata con differenti combinazioni a falsi colori, per la definizione delle aree di training con le quali addestrare l'algoritmo per la classificazione, si sono utilizzati anche i rapporti fra le bande e gli indici spettrali di vegetazione.

I rapporti fra le bande permettono di ottenere un'immagine nella quale sono messe in risalto le differenze spettrali fra le bande, consentendo inoltre di ridurre gli effetti derivanti dalla topografia del territorio.

Gli indici spettrali di vegetazione vengono utilizzati per ricavare indicazioni sulla discriminazione fra la vegetazione ed i suoli: queste due tipologie di copertura, infatti, mostrano un comportamento spettrale piuttosto contrastante a cavallo della regione del rosso e dell'infrarosso vicino, che può quindi essere utilizzata per differenziarle.

L'indice spettrale di vegetazione più utilizzato è l'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), basato sulla differenza normalizzata dei valori di riflettività ρ nell'infrarosso vicino ($\lambda = 0.75 \div 1.1 \mu\text{m}$) e nel rosso ($\lambda = 0.58 \div 0.75 \mu\text{m}$), espresso matematicamente dalla seguente relazione:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{ROSSO}}{\rho_{NIR} + \rho_{ROSSO}}$$

L'indice NDVI assume valori compresi nell'intervallo $[-1 \div 1]$ e, generalmente, i valori negativi corrispondono all'acqua, i valori vicini allo zero, ma positivi, corrispondono ai suoli, mentre i valori più elevati indicano la presenza di superfici vegetate.

Si sottolinea che gli indici spettrali di vegetazione non possono essere assunti come un riferimento assoluto, poiché estremamente sensibili alle proprietà ottiche dei suoli, per cui sono di difficile interpretazione quando sia sconosciuta la tipologia del suolo. A tali indici può essere comunque associato il seguente livello di interpretazione: più elevato è il valore che assumono, maggiore è la probabilità che l'area geografica in esame sia occupata da una copertura vegetale verde e rigogliosa.

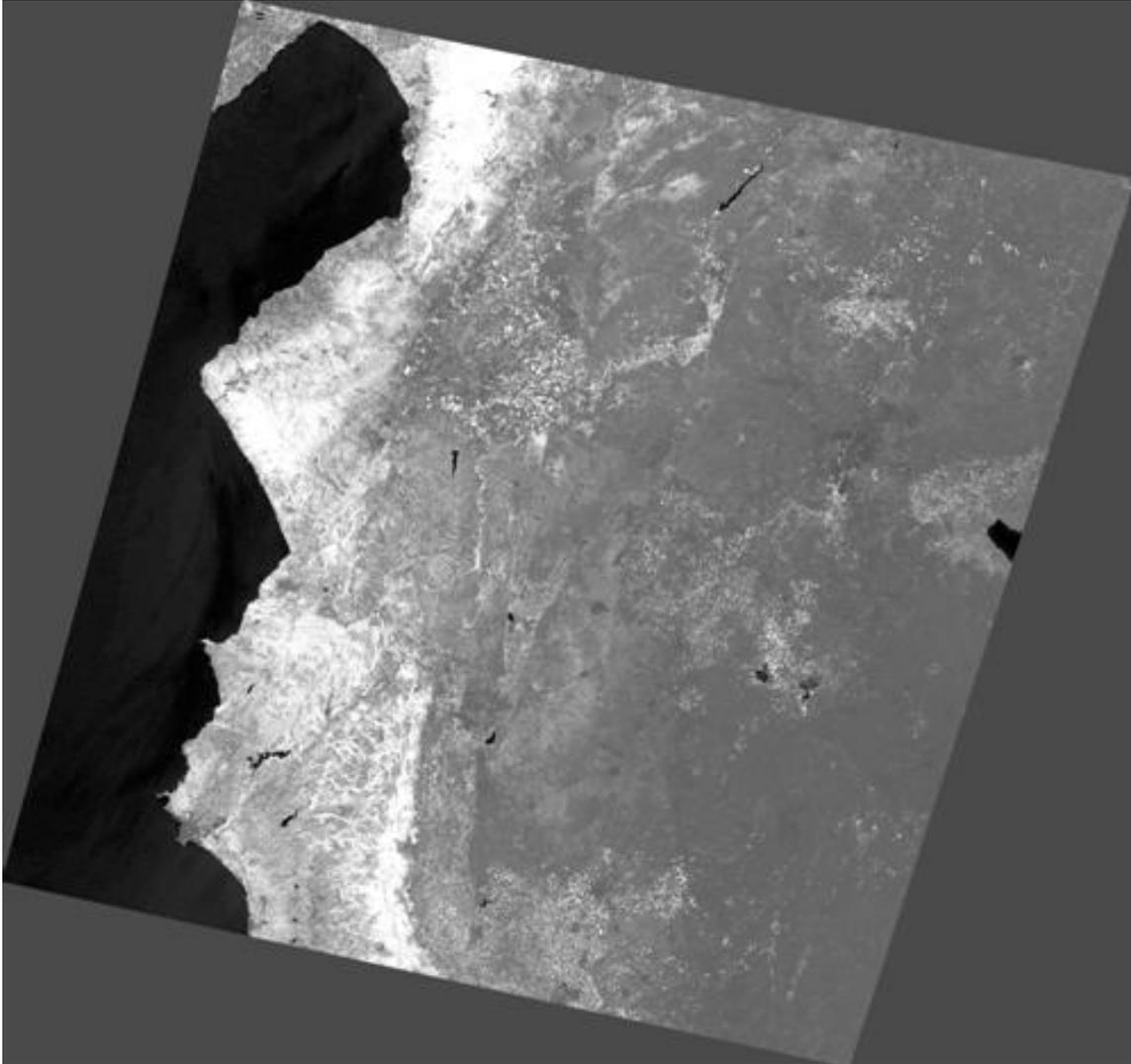


Figura 34. Immagine ottenuta dal calcolo dell'indice NDVI

Avendo a disposizione immagini a media risoluzione spaziale, si è deciso di definire una legenda formata da un limitato numero di classi tematiche, realizzando quindi una classificazione non eccessivamente dettagliata, cercando di individuare e classificare le principali tipologie di copertura presenti. Come criterio per l'esecuzione della classificazione si è fatto riferimento al modello internazionalmente noto come CORINE Land Cover, semplificandolo al un livello di dettaglio costituito solamente dalle categorie principali, ed integrandolo sulla base delle specificità riscontrabili sul territorio.

Operativamente si è potuto riscontrare come una medesima classe tematica fosse al suo interno molto variegata e risultasse costituita da classi spettrali differenti fra loro. In particolare, i principali problemi si sono avuti nella discriminazione fra l'urbanizzato ed i rilievi interni calcarei, probabilmente per il fatto che, come riportato in letteratura, il calcare è stato da sempre utilizzato come materiale da costruzione, e fra l'urbanizzato ed alcune tipologie di suolo nudo.

Al termine di un lungo processo di analisi, confronto ed incrocio di tutte le tipologie di informazioni a disposizione, sono state definite oltre 20 aree d'addestramento, molte delle quali costituite da differenti tipologie di urbanizzato, suolo e campi, sia coltivati che non.

Sono state effettuate molteplici elaborazioni con le tecniche di classificazione pixel – based, sia supervisionata che non, utilizzando i differenti algoritmi implementati nel software ENVI, al fine di valutare e confrontare le mappe tematiche risultanti dalle differenti metodologie di classificazione. Quello che si è potuto constatare, a livello di fotointerpretazione, è che i risultati qualitativamente migliori e più rappresentativi per il territorio osservato sono stati ottenuti con i metodi supervisionati ed in particolare con l'algoritmo di massima verosimiglianza.

La massima verosimiglianza (Maximum Likelihood) è un classificatore supervisionato che utilizza la distribuzione statistica dei valori di DN delle aree di addestramento rappresentative di ogni classe per assegnare un grado di probabilità di appartenenza ad ogni pixel dell'immagine: ogni pixel viene quindi assegnato alla classe a cui è associata la maggiore probabilità di appartenenza.

Sulla base delle informazioni di letteratura, l'utilizzo dell'algoritmo Maximum Likelihood rappresenta nella maggior parte dei casi la strategia migliore da adottare quando esistono problemi di ambiguità fra le classi.

Al fine di consentire la comprensione della classificazione prodotta si riporta la legenda utilizzata per la rappresentazione della mappa tematica.

COLORE	DESCRIZIONE
Rosso	Urbanizzato
Verde chiaro	Campi coltivati
Verde scuro	Superfici vegetate naturali
Blu	Corpi idrici
Giallo	Suolo nudo e campi non coltivati
Ciano	Rilievi interni calcarei
Ciano scuro	Frutticoltura
Viola	Altra tipologia di rilievi

Tabella 5. Legenda della mappa tematica sotto riportata

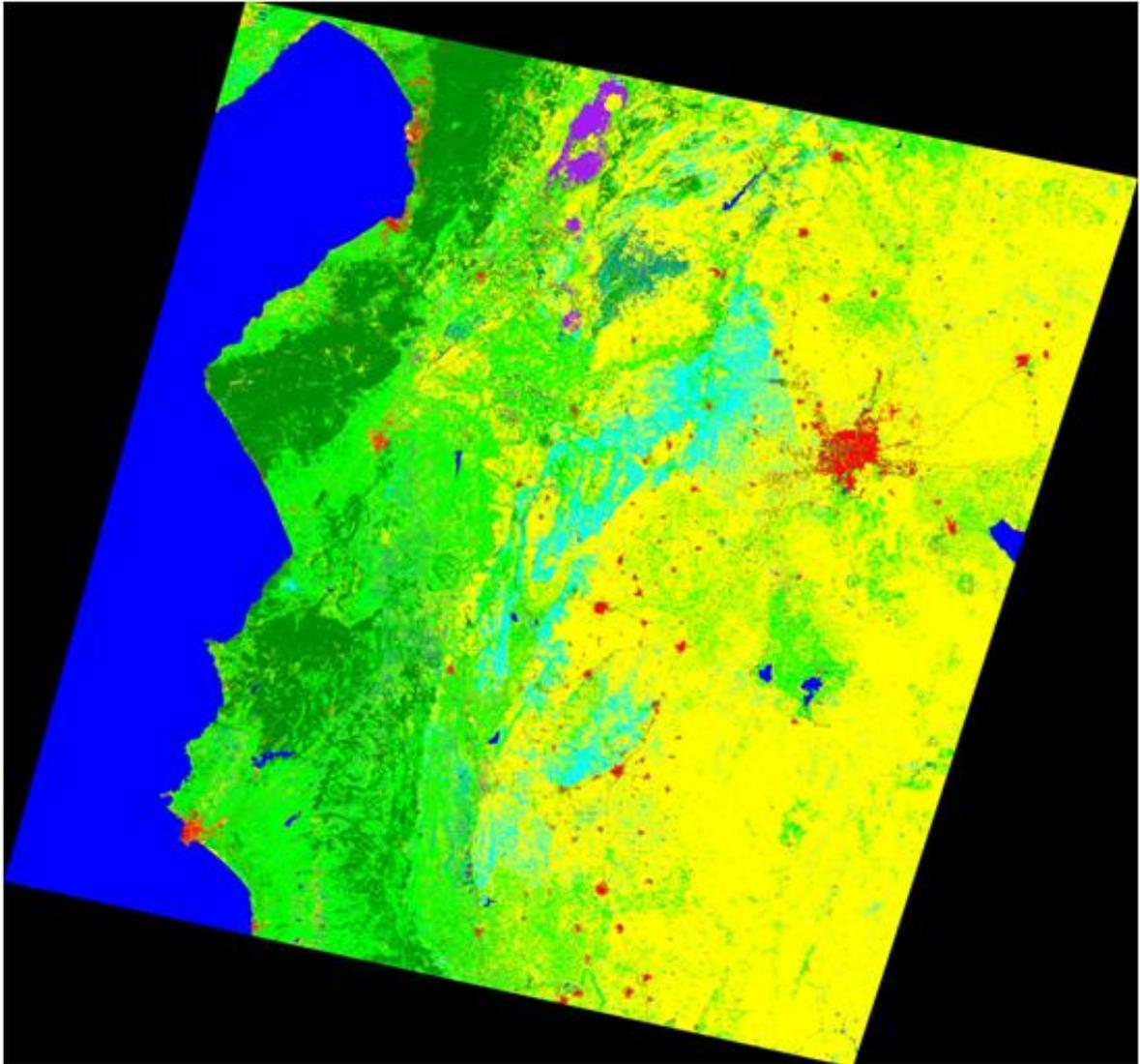


Figura 35. Classificazione ottenuta attraverso l'applicazione dell'algoritmo di massima verosimiglianza

All'immagine così ottenuta sono state applicate le tecniche di post – classificazione per consentire di omogeneizzare la mappa tematica, risolvendo le problematiche connesse alle presenza di pixel isolati ed alla mancanza di coerenza spaziale. Nel dettaglio sono state utilizzate, in sequenza, le due funzioni seguenti:

- Sieve, che opera un filtraggio all'interno di una medesima classe
- Clump, che opera un'operazione di raggruppamento all'interno di una medesima classe.

Tali metodi funzionano come fossero filtri passo basso, riducendo quindi il rumore e diminuendo la frequenza spaziale dell'immagine. A seguito dell'applicazione di queste metodologie di post – classificazione, al posto dei pixel classificati, per i quali non risultino soddisfatte determinate condizioni di coerenza con quelli vicini, è lasciata un'area nera, ossia una zona non classificata.

Nello specifico, si è deciso di utilizzare tali due funzioni impostando i parametri minimi di funzionamento in maniera tale da non modificare e non alterare eccessivamente la classificazione ottenuta, acquisendo l'immagine sotto riportata.

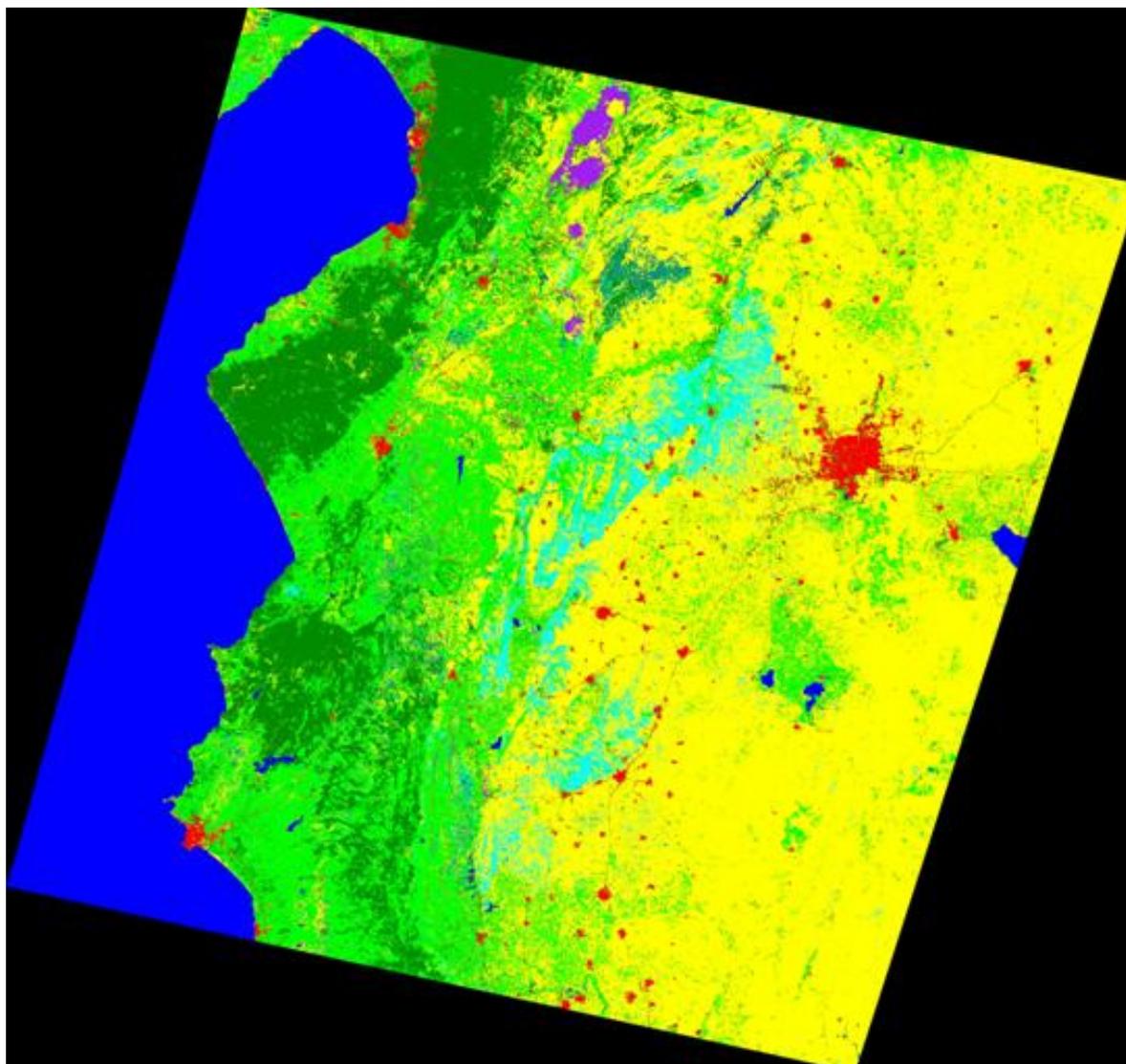


Figura 36. Immagine ottenuta a seguito dell'applicazione delle tecniche di post – classificazione

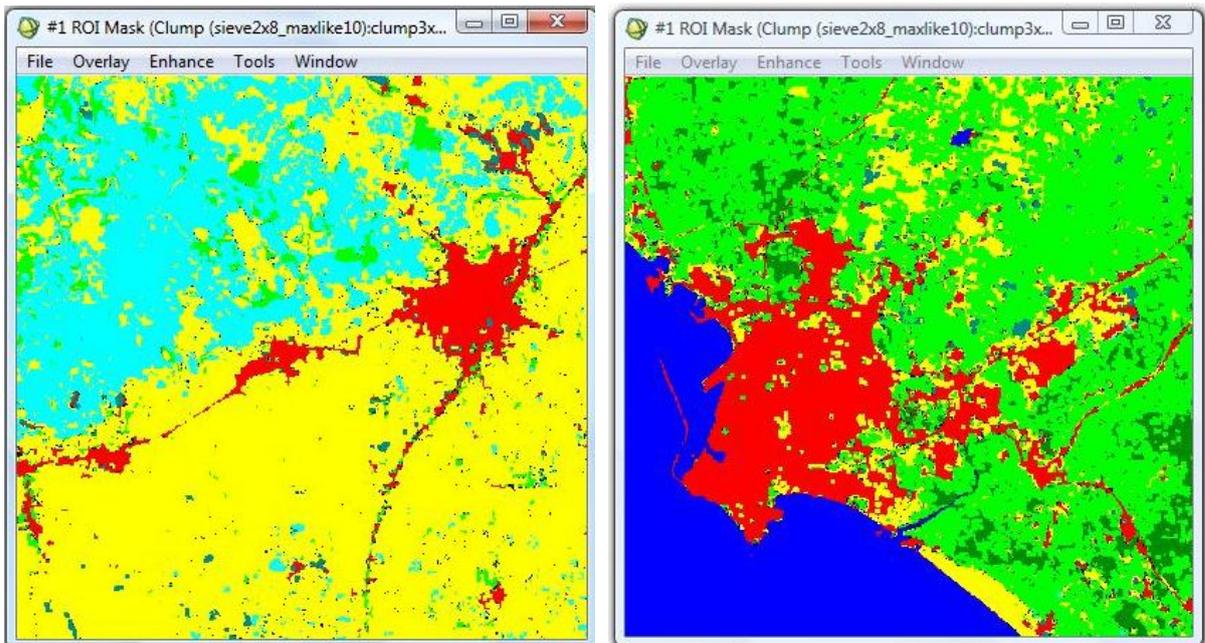


Figura 37. A sinistra le città di Ma'arrat Al - Nu'man (più grande) e Hass, collocate lungo l'autostrada che collega Aleppo ad Hama; a destra Laodicia, antico nome dell'odierna Latakia, la più importante città portuale della Siria.

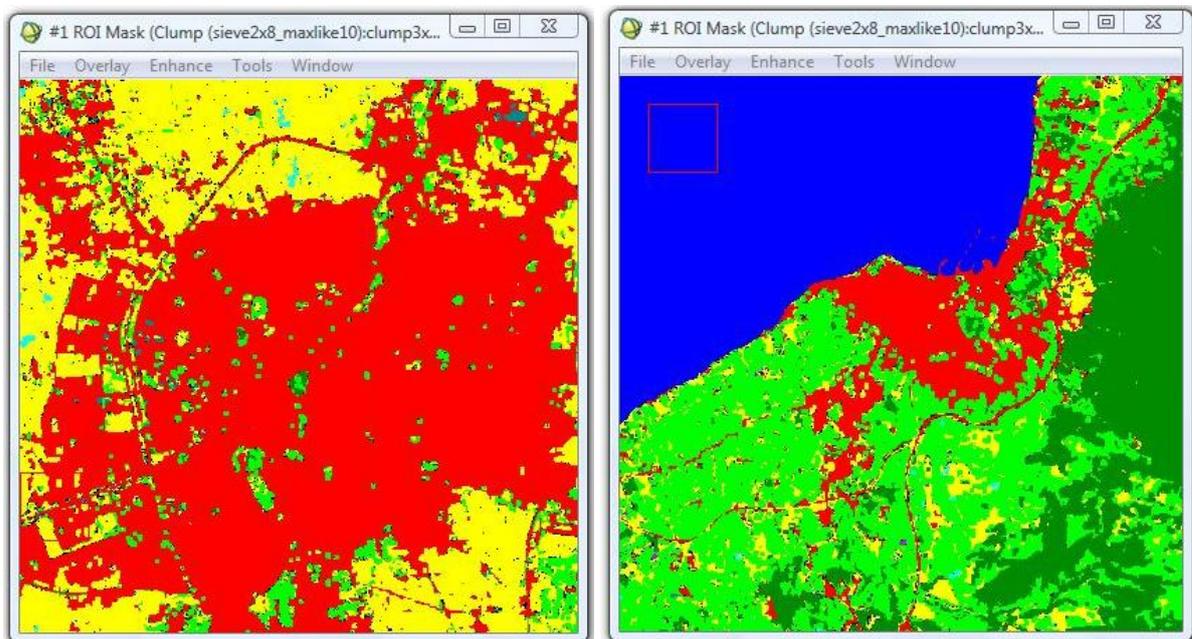


Figura 38. A sinistra Aleppo, la città più popolosa della Siria e per questo detta la capitale del nord; a destra Alessandretta, antico nome di Iskenderun, città turca vicino al confine con la Siria.

Non disponendo di dati di verità a terra, non è possibile valutare quantitativamente l'accuratezza della mappa tematica ottenuta. Si è quindi deciso di effettuare differenti comparazioni con i dati a disposizione, aventi la finalità di valutare qualitativamente la rispondenza fra la classificazione ottenuta ed il territorio in esame.

Per avere una prima idea del risultato ottenuto, le latifoglie e le conifere sono state visualizzate con colori differenti: nel dettaglio, le conifere vengono rappresentate in magenta mentre le latifoglie in bianco.

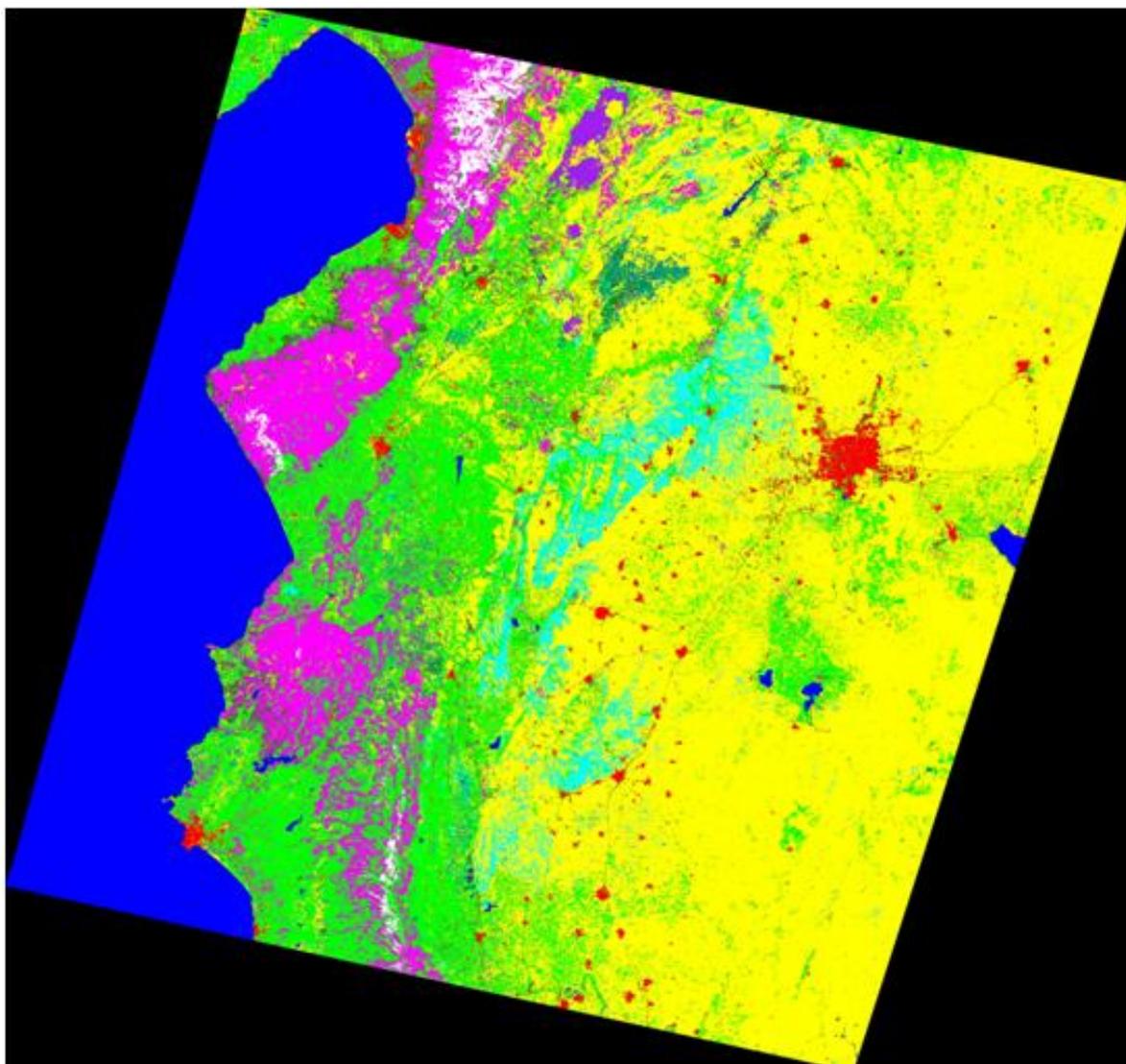


Figura 39. Immagine classificata nella quale sono state messe in evidenza le zone classificate come conifere, in magenta e quelle a latifoglie, in bianco.

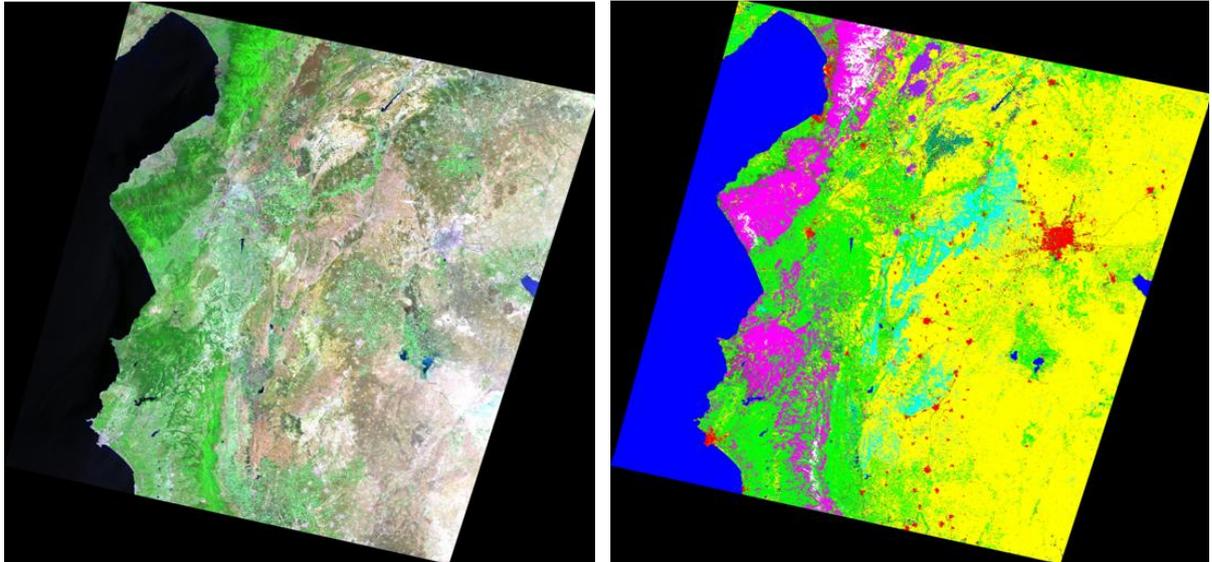


Figura 40. Confronto tra la visualizzazione 742 e l'immagine classificata per valutare la distinzione fra latifoglie e conifere

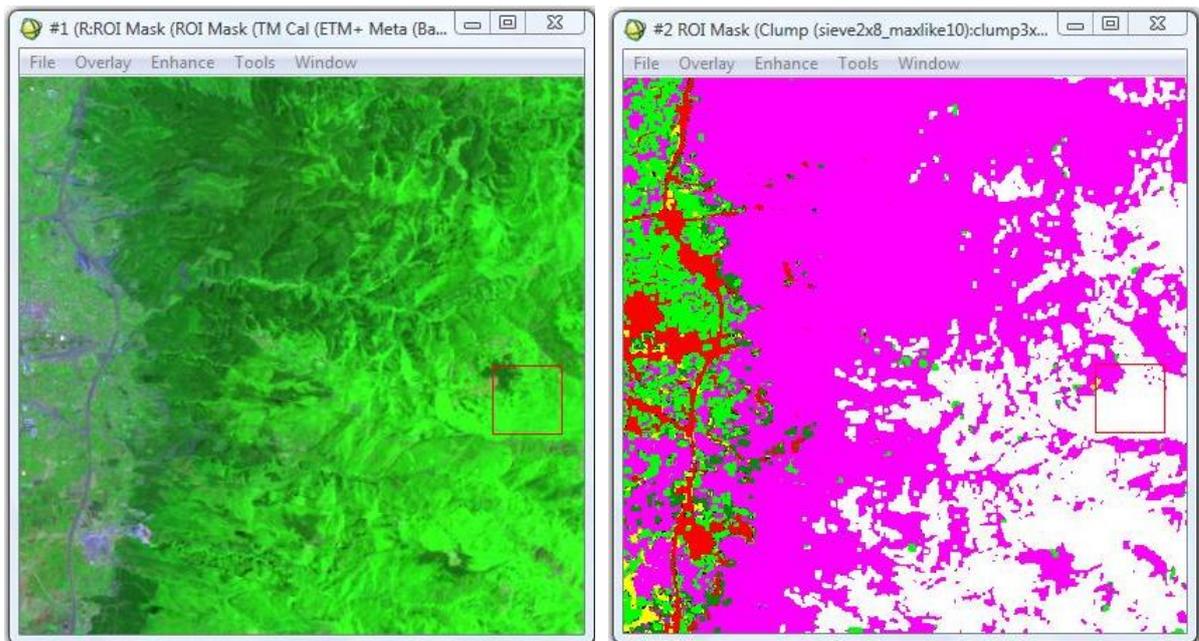


Figura 41. Dettaglio della distinzione fra latifoglie e conifere

Inoltre, si è confrontata la classificazione ottenuta con l'immagine risultante dal calcolo dell'indice NDVI, per valutare la corretta distinzione fra superfici vegetate e non.

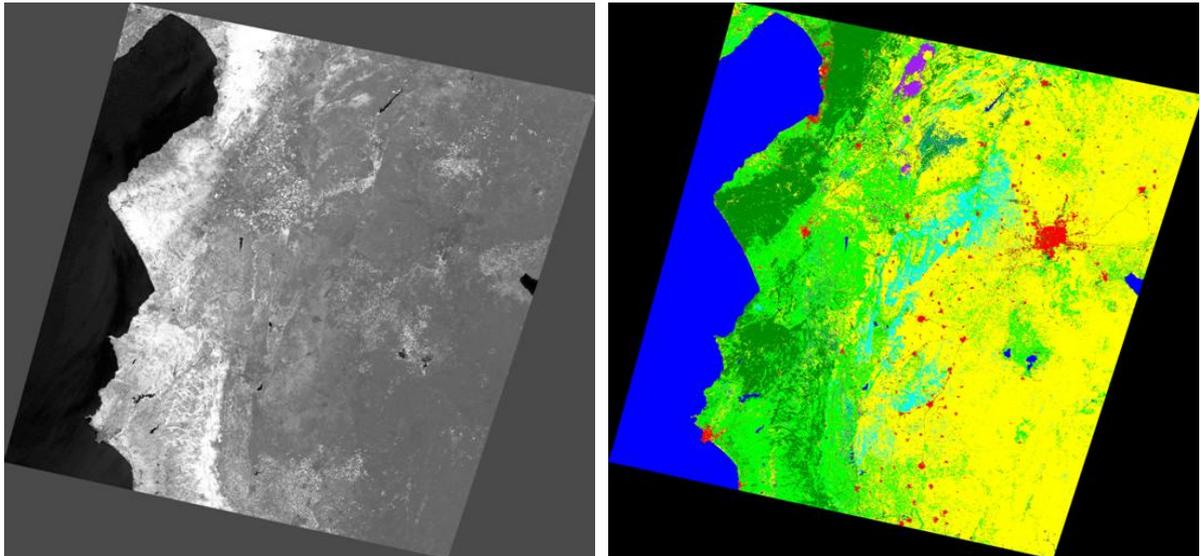


Figura 42. Confronto fra l'immagine ottenuta mediante il calcolo dell'indice NDVI e la mappa tematica

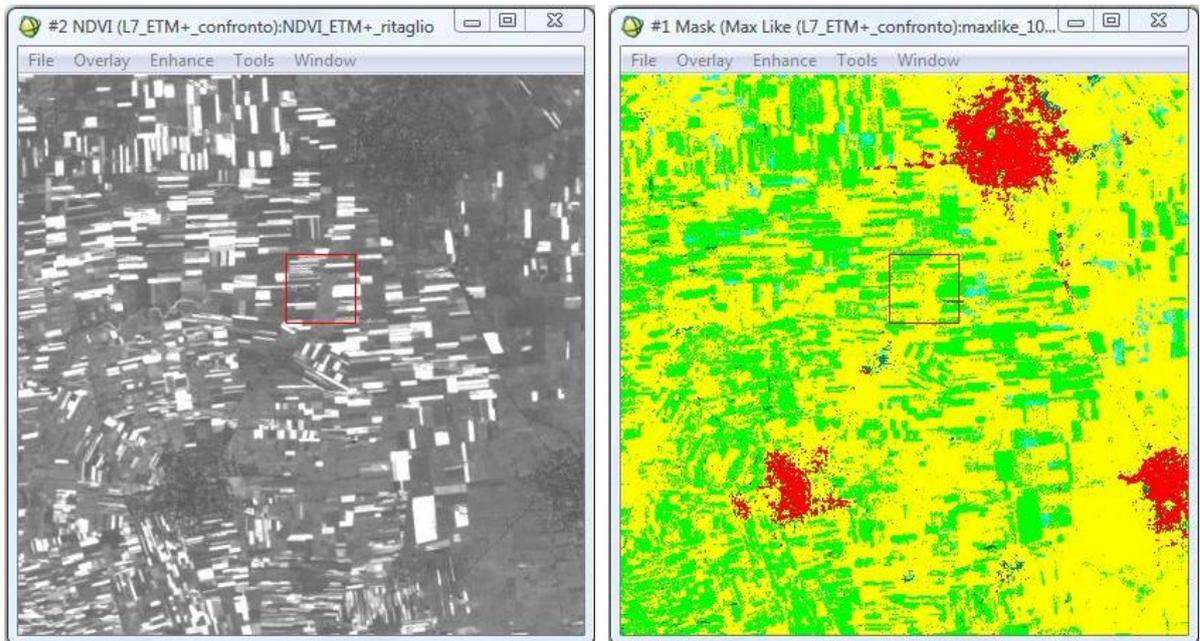


Figura 43. Dettaglio del confronto fra l'indice NDVI e la classificazione prodotta

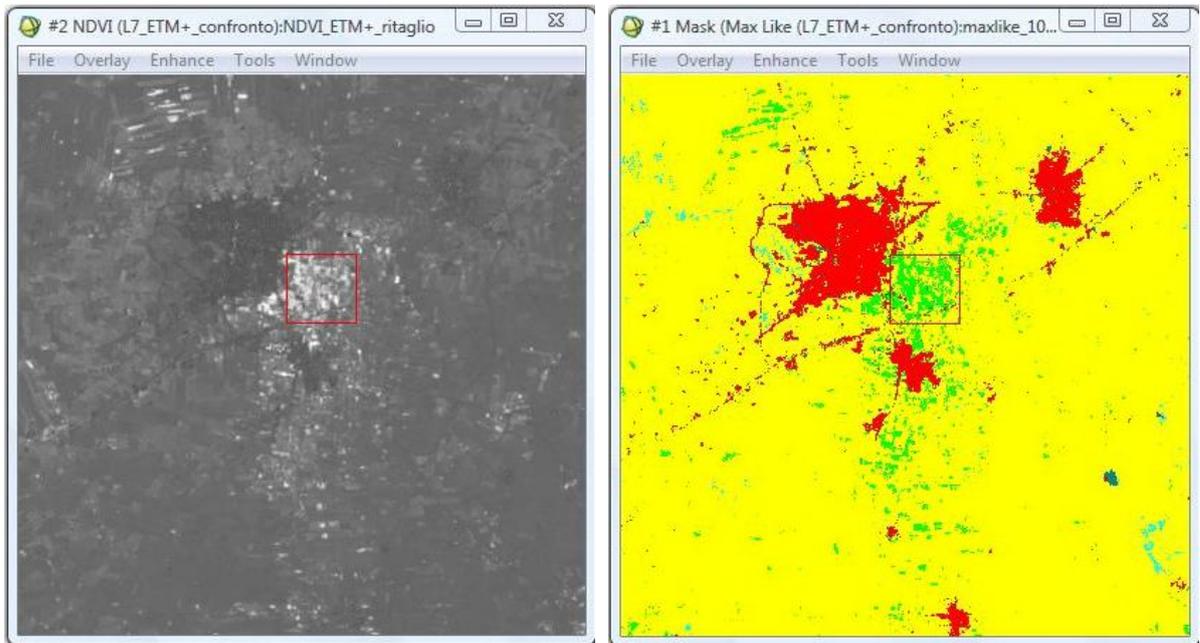


Figura 44. Dettaglio del confronto fra l'indice NDVI e la mappa tematica

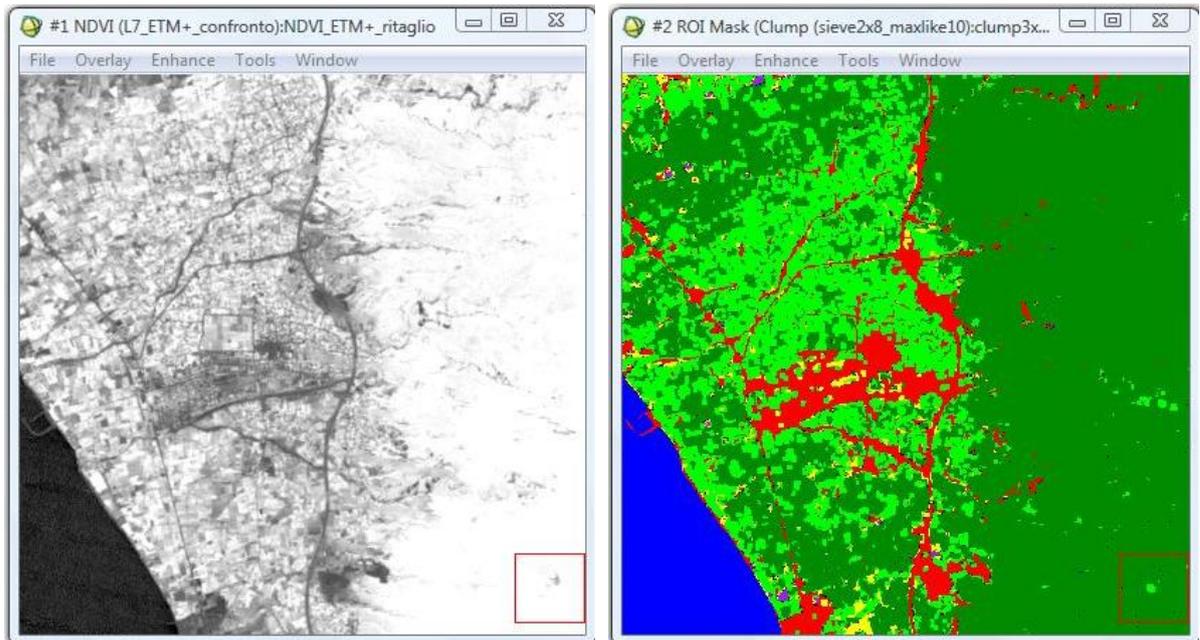


Figura 45. Dettaglio del confronto fra l'indice NDVI e la mappa tematica

Infine, una maniera interessante per valutare il risultato della classificazione, pur non disponendo di dati di verità a terra, può consistere nell'esportare l'immagine in Google Earth e verificare visivamente il grado di sovrapposizione raggiunto.

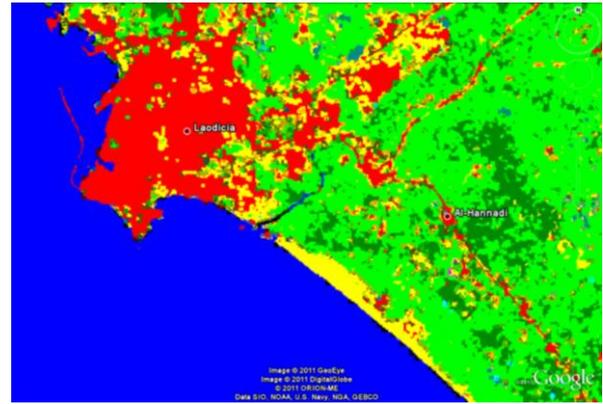
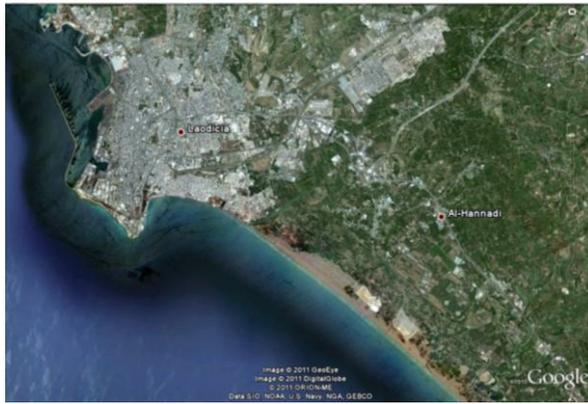


Figura 46. Latakia

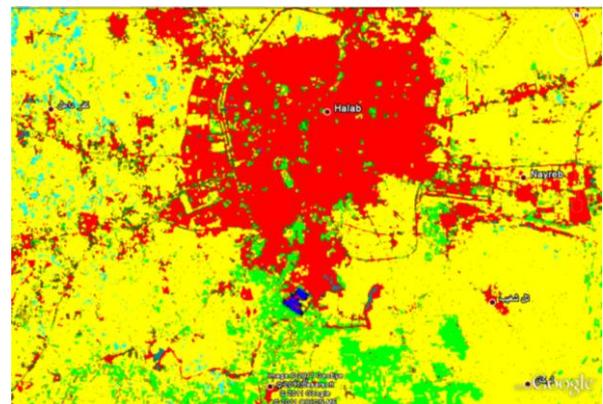
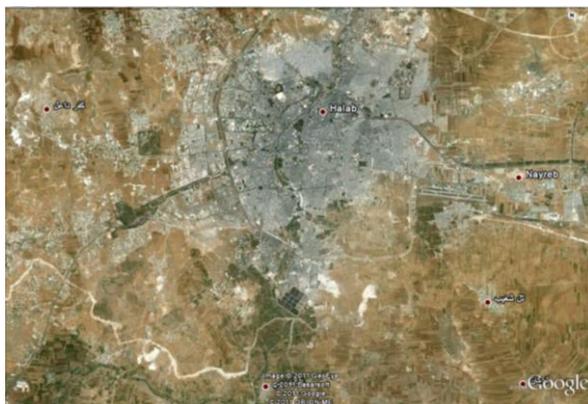


Figura 47. Aleppo

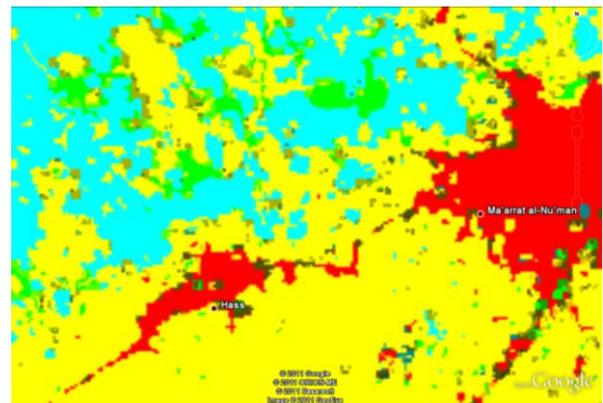
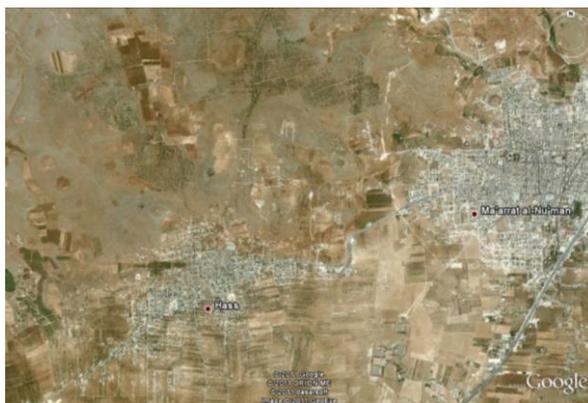


Figura 48. Ma'arrat Al - Nu'man e Hass

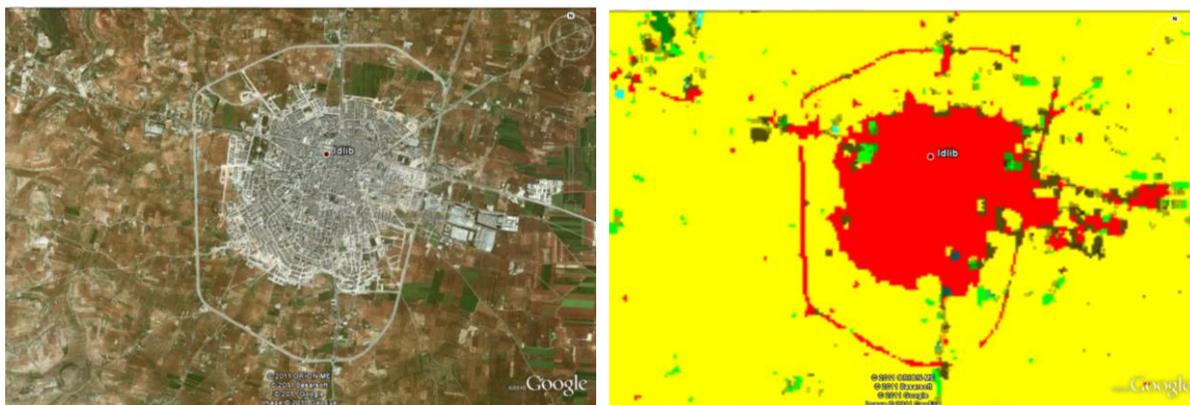


Figura 49. Idlib

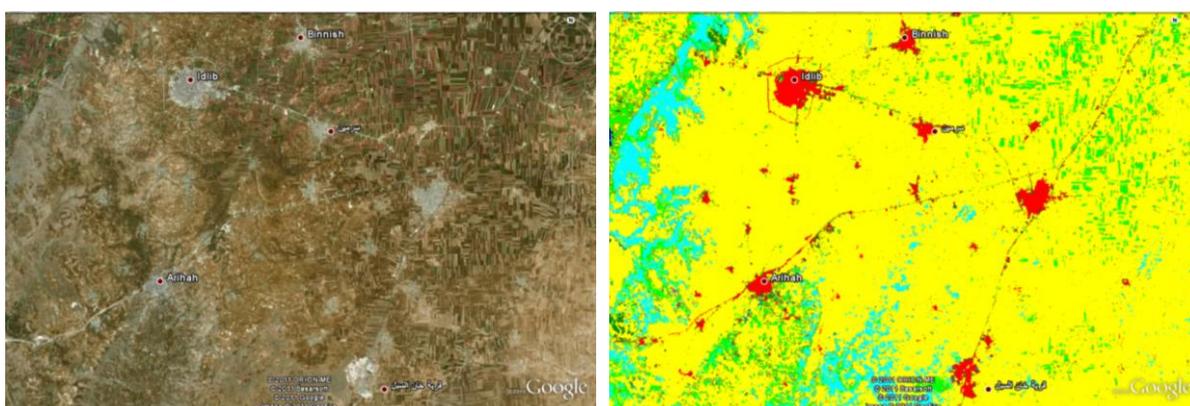


Figura 50. Zona caratterizzata da un'elevata urbanizzazione: sono visibili, fra le altre, le città di Idlib, Saraqib, Binnish, Arihah e Tell Mardikh

Dalle immagini di confronto sopra riportate si ricava che è stata prodotta una classificazione che ben rappresenta il territorio in esame.

Inoltre, si è anche eseguita una classificazione con l'algoritmo di massima verosimiglianza imponendo una soglia, uguale per tutte le classi, e pari a 0.9: questo significa che un pixel viene assegnato ad una classe solo se presenta una probabilità minima del 90% di appartenere a quella determinata classe.

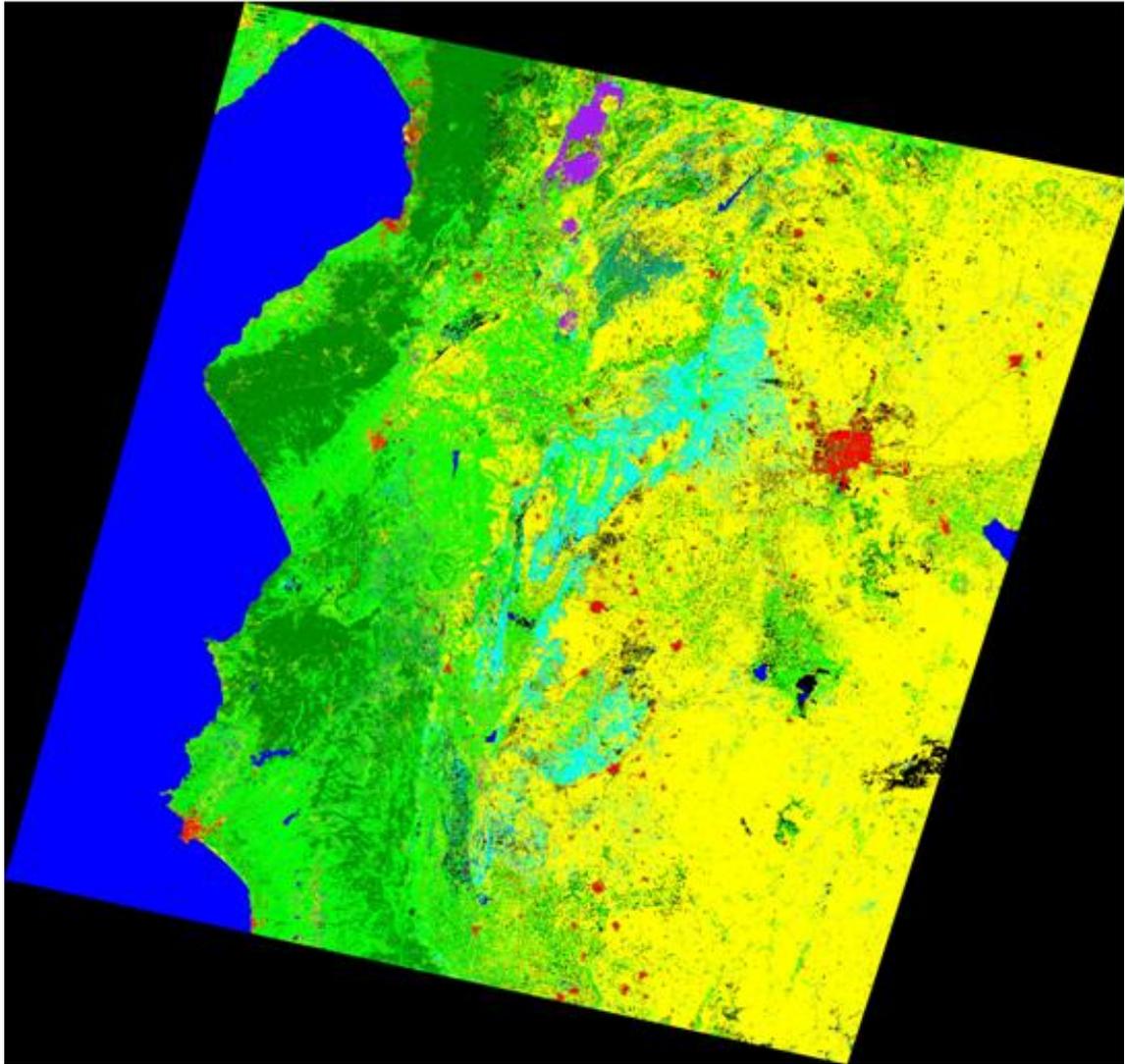


Figura 51. Classificazione del territorio con una probabilità minima del 90%

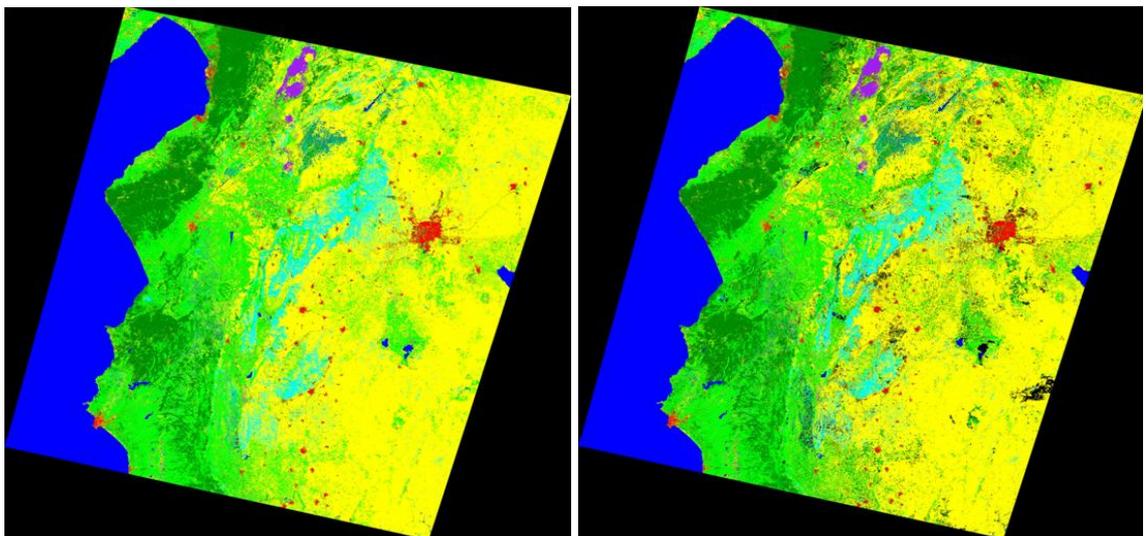


Figura 52. Confronto fra la classificazione senza soglia, a sinistra, e con una soglia pari a 0.9 ed uguale per ogni classe, a destra

Tale confronto costituisce un'ulteriore dimostrazione del buon livello qualitativo della classificazione ottenuta, in quanto sono limitate le zone nere, ossia non classificate, presenti nell'immagine; ciò significa quindi che i pixel sono assegnati alle differenti classi tematiche con una probabilità minima del 90%.

7.3. Analisi multitemporale

Come anticipato, una delle principali applicazioni del Telerilevamento è quella di permettere analisi multitemporali con il fine di identificare e valutare le modificazioni del territorio, le trasformazioni del paesaggio, la crescita e l'espansione urbana. Si è quindi eseguita la classificazione di un'immagine acquisita dal satellite Landsat 5 TM in data 11 giugno 1987 confrontandola poi con quella relativa al giugno del 2007.

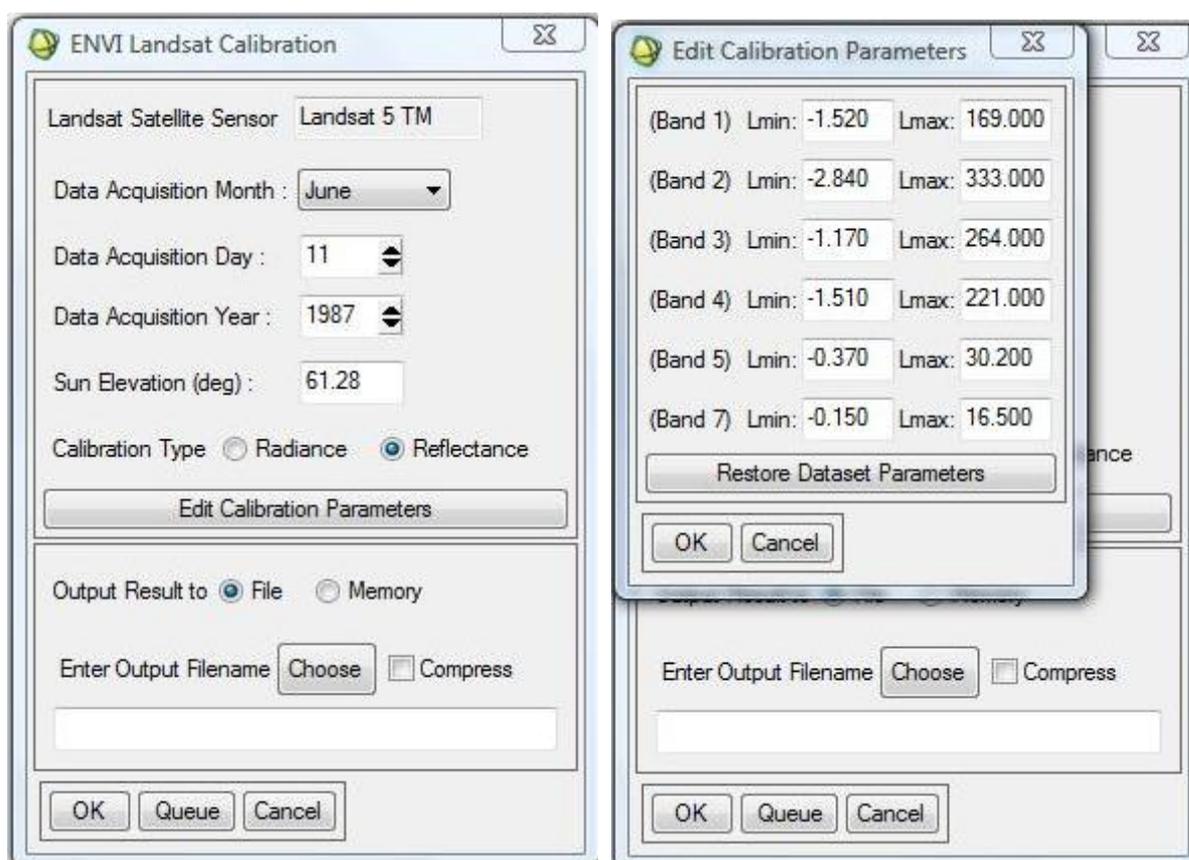


Figura 53. Parametri per la calibrazione radiometrica dell'immagine Landsat 5 TM acquisita in data 11/06/1987

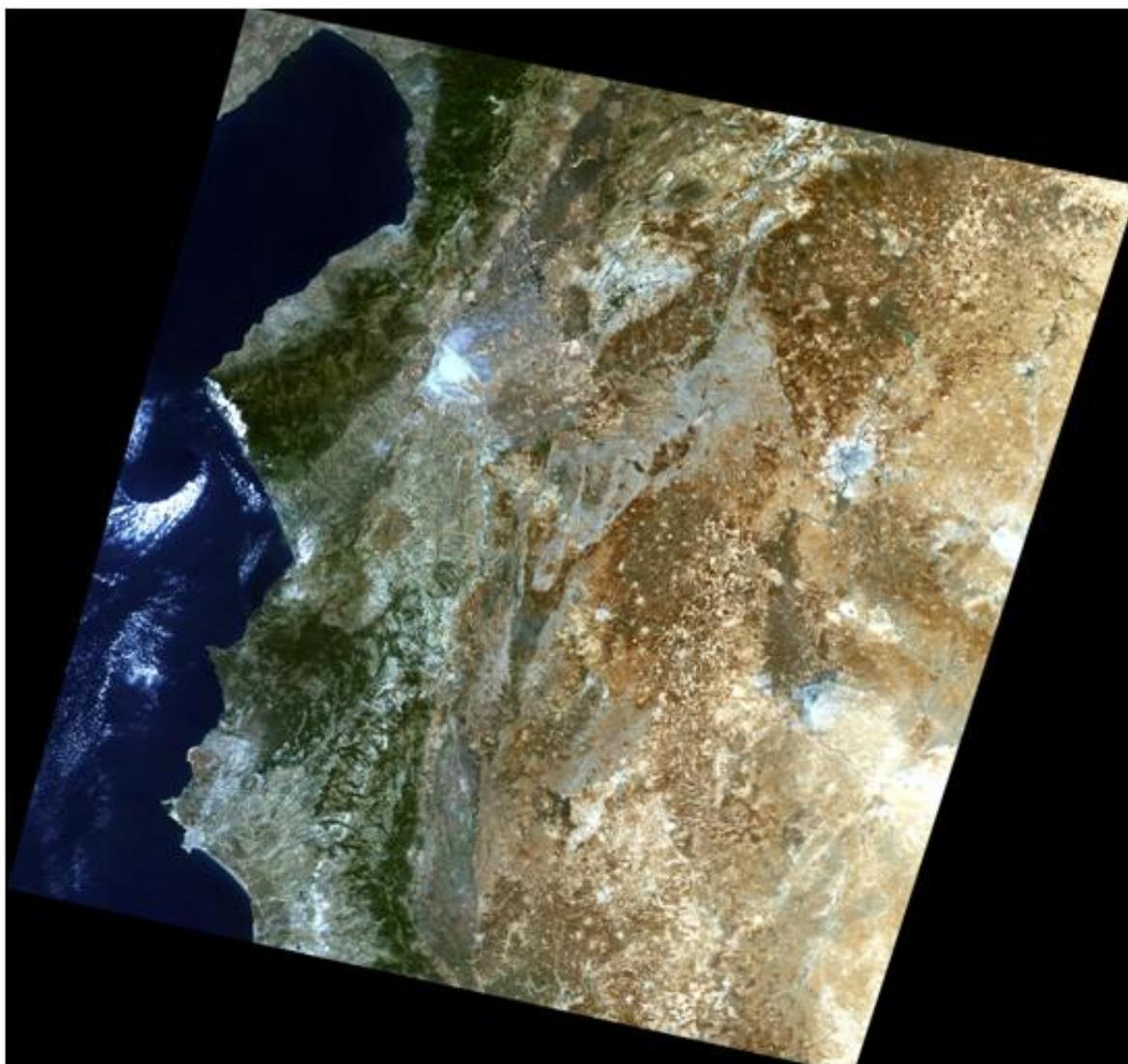


Figura 54. Immagine del giugno 1987 calibrata radiometricamente e ritagliata

Applicando le medesime metodologie precedentemente riportate e sulla base della classificazione precedentemente realizzata si è ottenuta la seguente classificazione.

COLORE	DESCRIZIONE
Rosso	Urbanizzato
Verde chiaro	Campi coltivati
Verde scuro	Superfici vegetate naturali
Blu	Corpi idrici

Giallo	Suolo nudo e campi non coltivati
Ciano	Rilievi interni calcarei
Ciano scuro	Frutticoltura
Viola	Altra tipologia di rilievi
Bianco	Copertura nuvolosa

Tabella 6. Legenda della mappa tematica sotto riportata

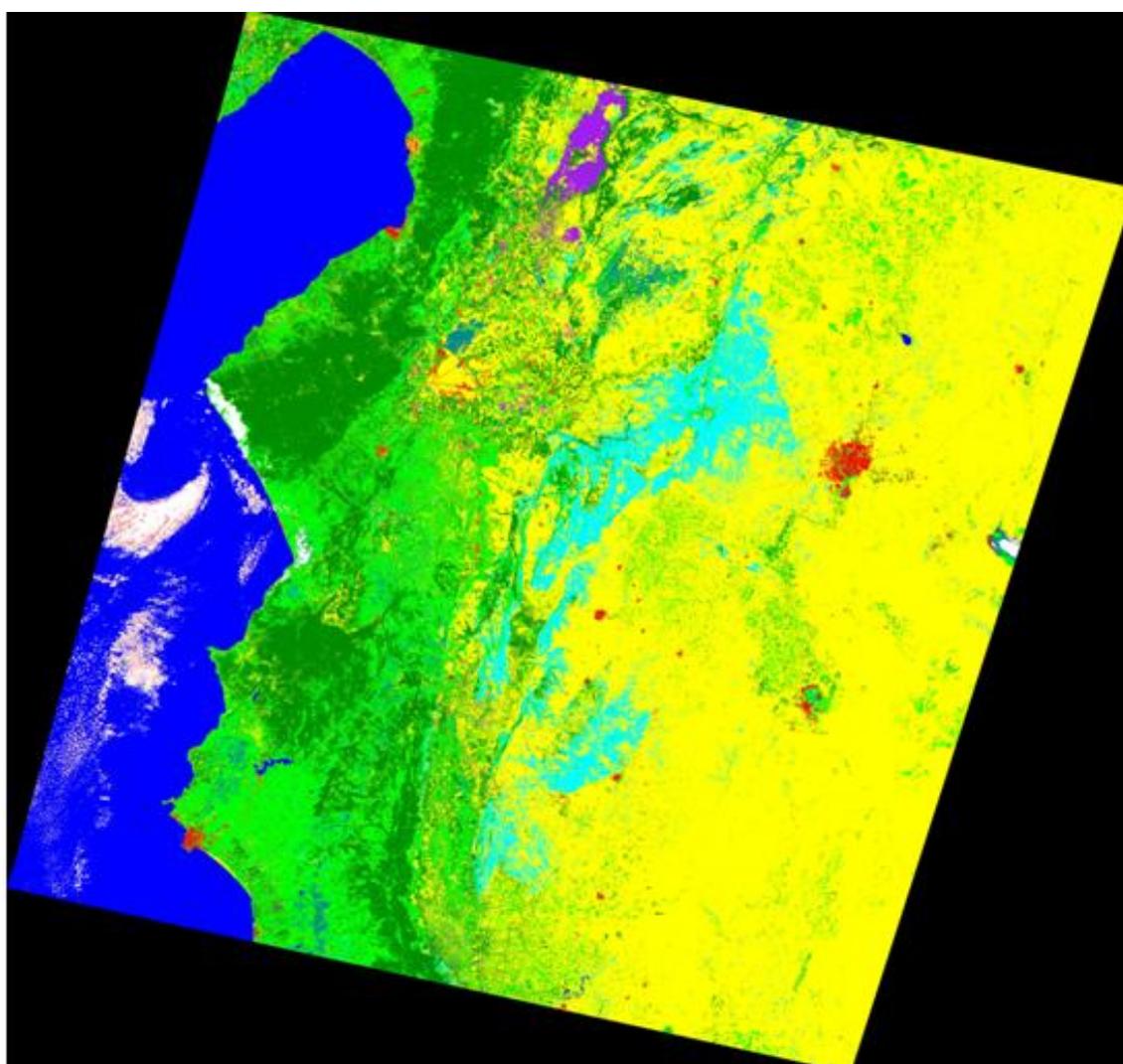


Figura 55. Classificazione ottenuta attraverso l'applicazione dell' algoritmo di massima verosimiglianza

All'immagine così ottenuta sono state quindi applicate le tecniche di post – classificazione, impostando anche in questo caso i parametri minimi di funzionamento per le due funzioni utilizzate.

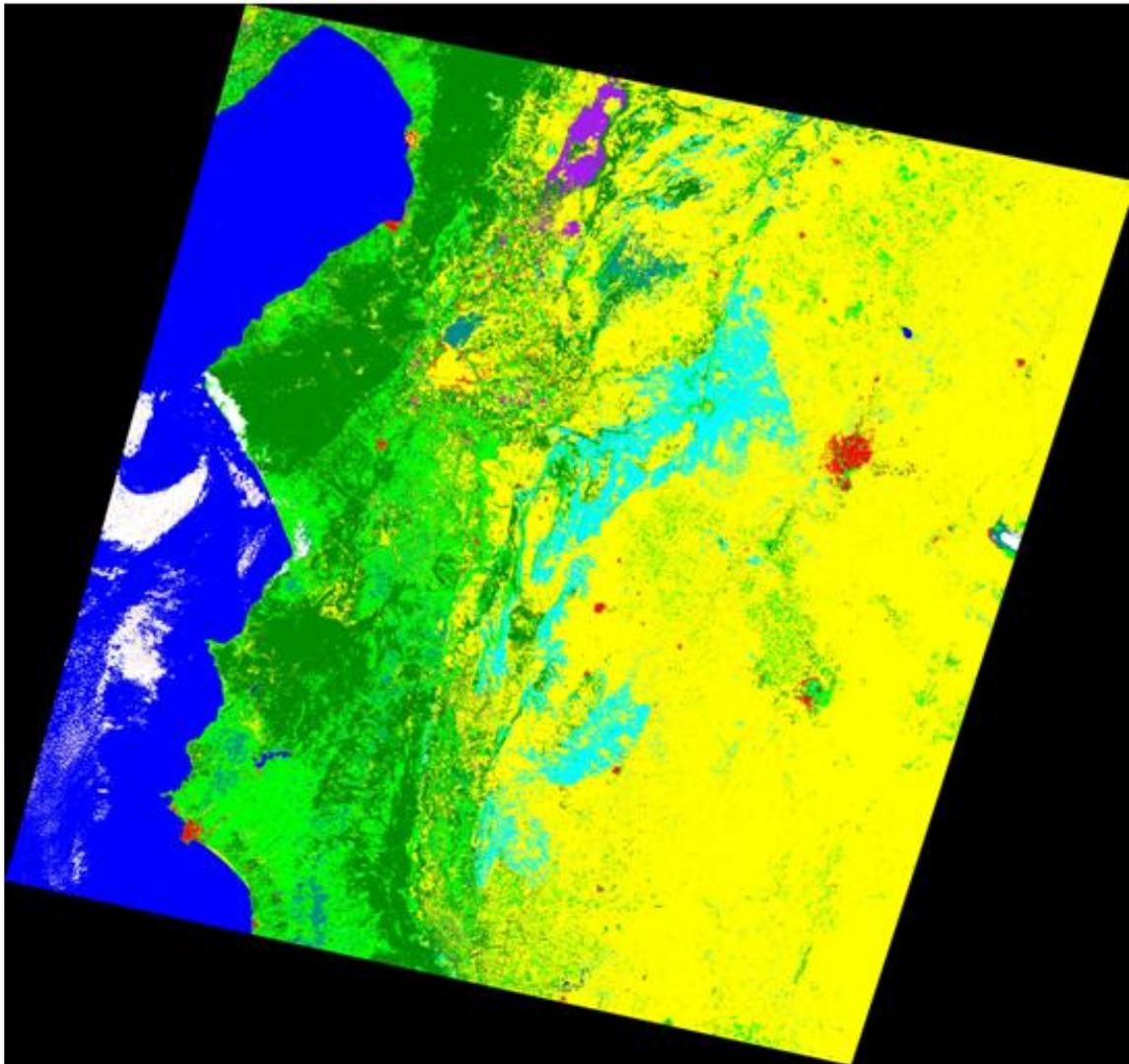


Figura 56. Mappa tematica ottenuta a partire dalla classificazione sopra riportata, a seguito dell'applicazione delle tecniche di post – classificazione

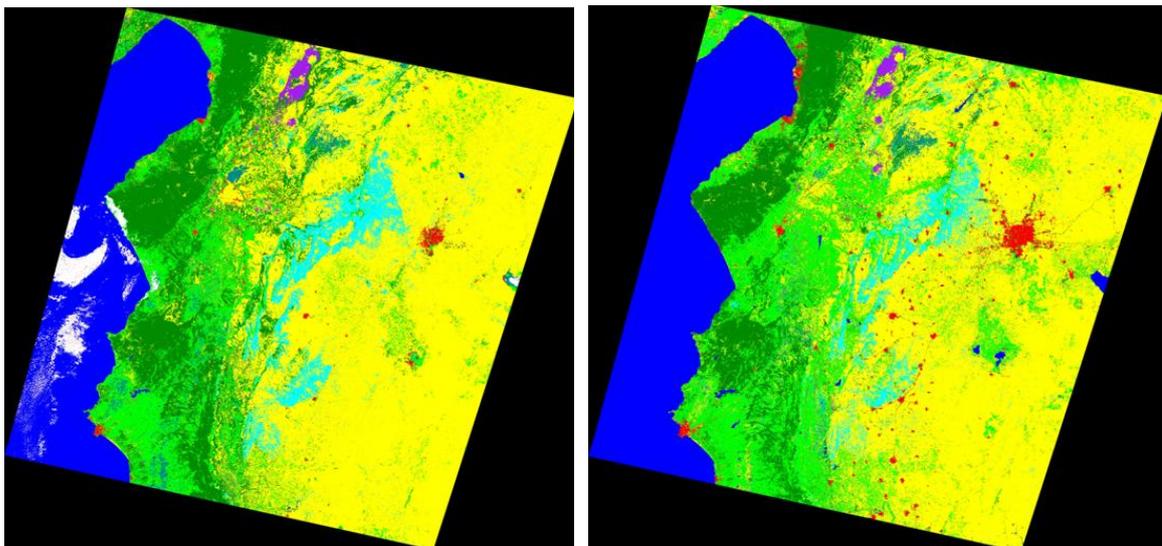


Figura 57. Confronto multitemporale: a sinistra è riportata la classificazione del 1987, a destra quella del 2007

Nella mappa tematica sottostante viene riportata la distinzione fra le due specie vegetative identificate nel corso delle elaborazioni precedenti: in particolare, le conifere vengono rappresentate in magenta mentre le latifoglie in grigio chiaro.

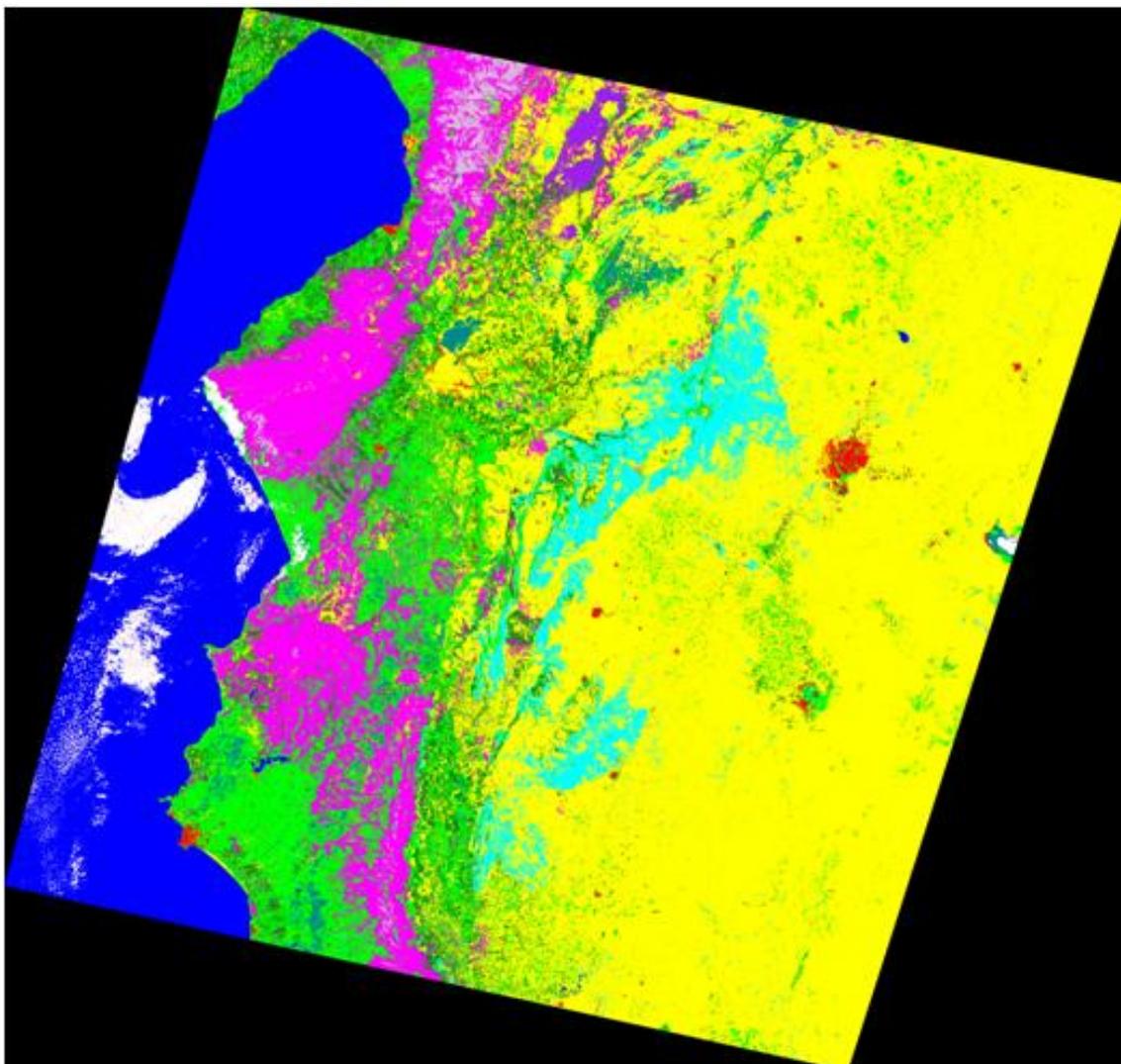


Figura 58. Mappa tematica con dettaglio delle zone classificate come conifere, in magenta e quelle a latifoglie, in grigio chiaro.

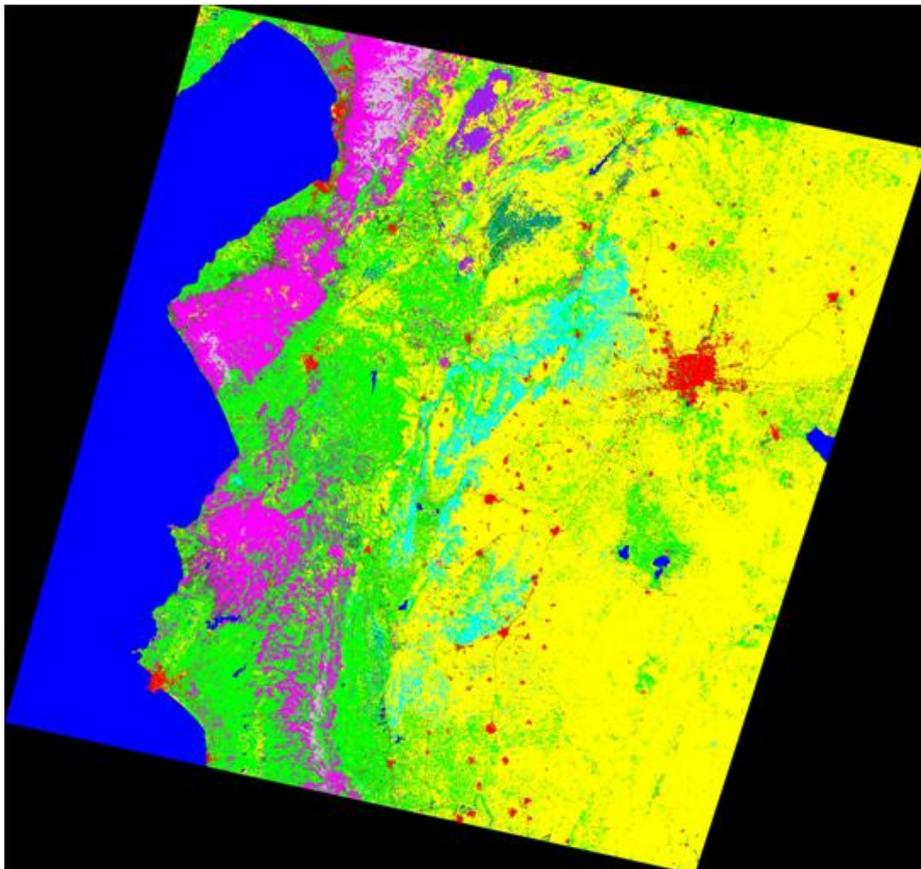
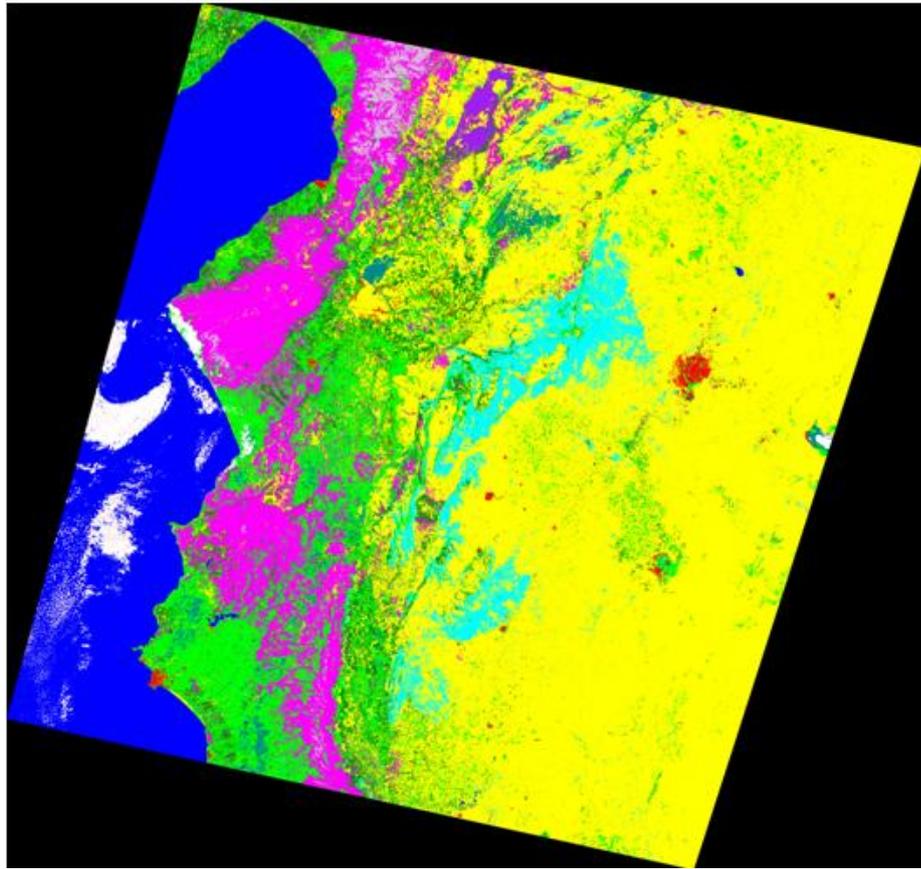


Figura 59. Confronto multitemporale: in alto è riportata la classificazione del 1987, in basso quella del 2007

Come si può ricavare dal confronto fra le due immagini sopra riportate, nel territorio analizzato non si evidenziano particolari trasformazioni significative, eccezion fatta per l'espansione e la crescita urbana. E' infatti facilmente identificabile l'aumento delle aree urbanizzate e l'espansione delle principali città della Siria interna settentrionale; tale risultato è inoltre avvalorato dalle informazioni a disposizione, dalle quali risulta che, negli ultimi decenni, il territorio in analisi è stato soggetto ad un processo di urbanizzazione particolarmente intenso.

Altre modificazioni che risultano individuabili riguardano l'aumento delle superfici coltivate e dei corpi idrici, così come riscontrabile anche nelle informazioni a disposizione, a seguito dei progetti, portati avanti dal governo siriano, per implementare una coltura di tipo irriguo con relativo aumento delle superfici irrigate. E' inoltre possibile apprezzare come tale ampliamento non sia realizzato solamente attraverso la messa a coltura di aree precedentemente non coltivate, ma avvenga anche a discapito delle superfici vegetate naturali, ed in particolare delle conifere, determinandone quindi la relativa diminuzione.

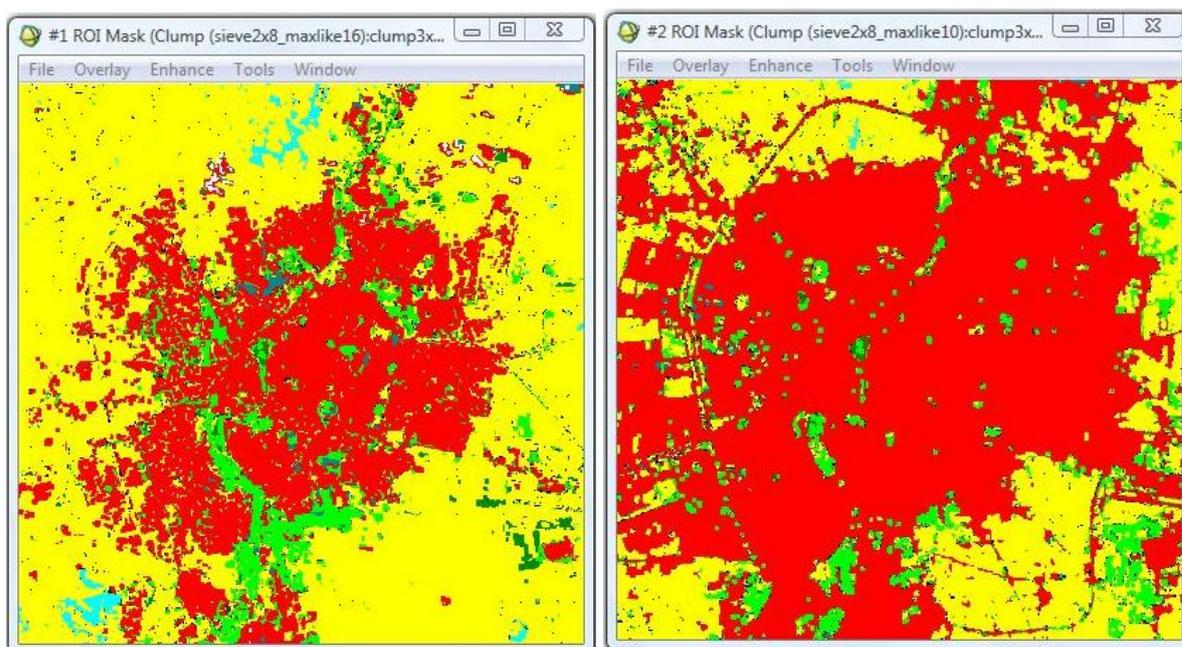


Figura 60. Aleppo

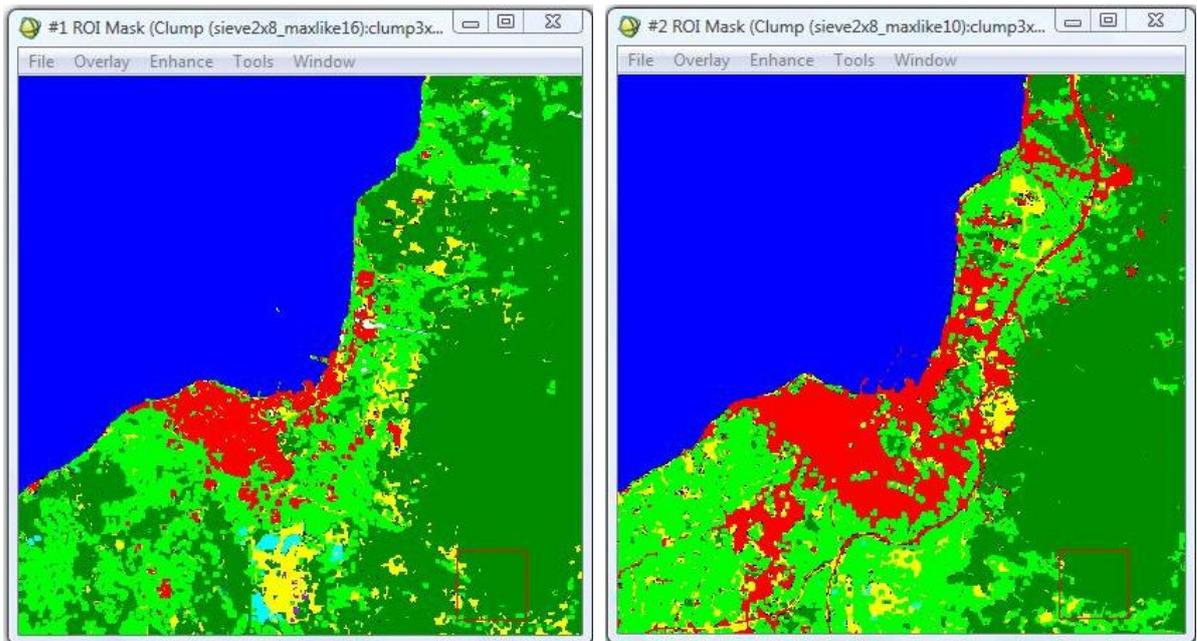


Figura 61. Iskenderun

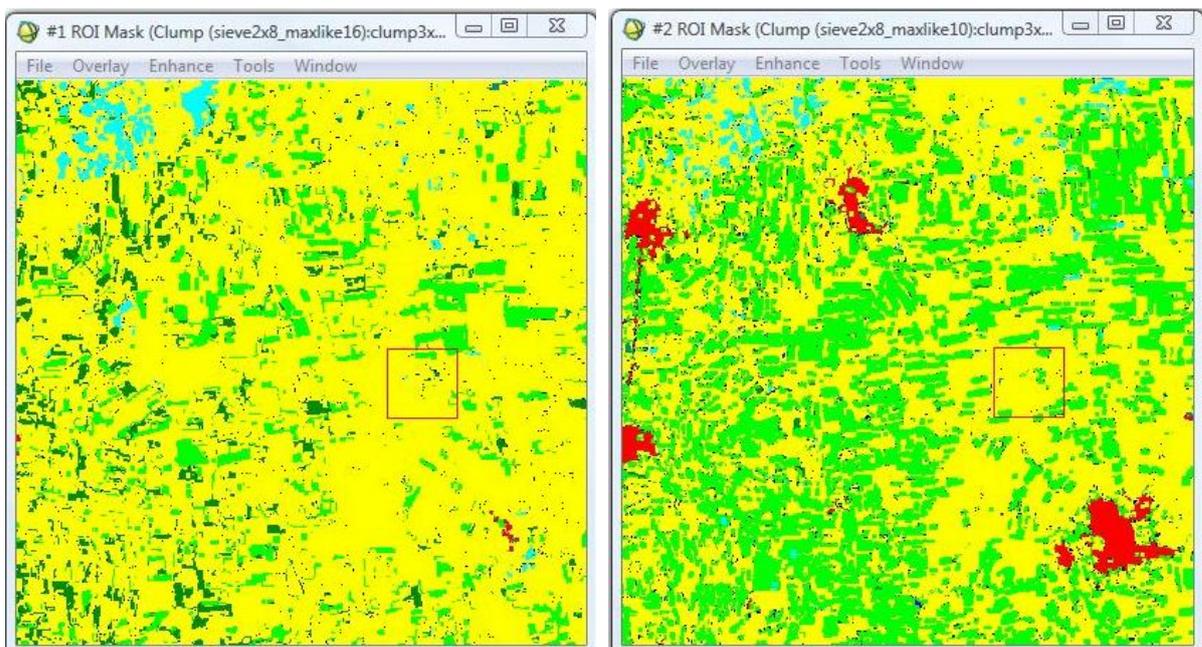


Figura 62. Espansione urbana ed incremento delle superfici coltivabili in un'area della Siria interna settentrionale

7.4 Classificazione di un'immagine ASTER

Successivamente all'elaborazione delle immagini Landsat si è passati alla fotointerpretazione di un'immagine ASTER al fine di analizzare più in dettaglio una regione di grande interesse dal punto di vista archeologico in quanto comprendente numerosi siti di interesse, il cui posizionamento approssimato è stato effettuato dall'archeologo S. Mantellini per conto della missione dell'Università di Bologna coordinata dal Prof. Marchetti. Il posizionamento è avvenuto sulla base di cartografia sovietica in scala 1:100.000 ed attraverso l'analisi di immagini satellitari declassificate; sono stati inoltre considerati i risultati del primo survey eseguito dallo stesso team nel 2010. Si tratta in ogni caso di un'informazione preliminare che potrà trovare riscontro solo a seguito di un sopralluogo diretto, attualmente non possibile.

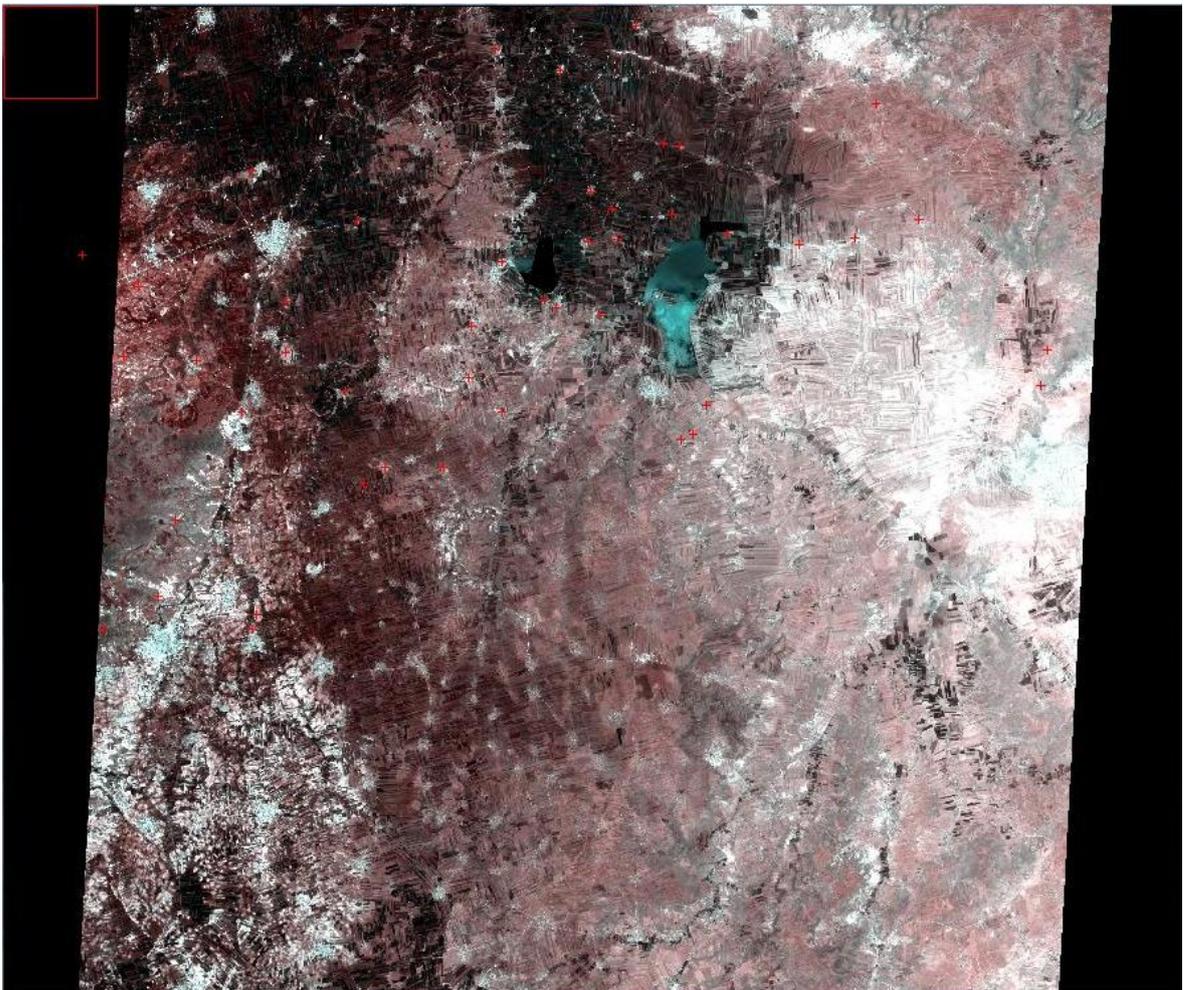


Figura 63. Immagine ASTER visualizzata a colori reali. Le croci in rosso rappresentano la localizzazione dei principali siti archeologici in esame (Mantellini), alcuni dei quali ancora da verificare

In particolare, si è lavorato su un'immagine acquisita in data 25/05/2007 ed appartenente al livello 1B, che comprende le immagini corrette radiometricamente e geometricamente, ma non ortorettificate. Pertanto, preliminarmente all'esecuzione della classificazione, si è effettuata l'ortorettifica dell'immagine ASTER utilizzando il DSM SRTM e ricampionando i pixel a 30 m.

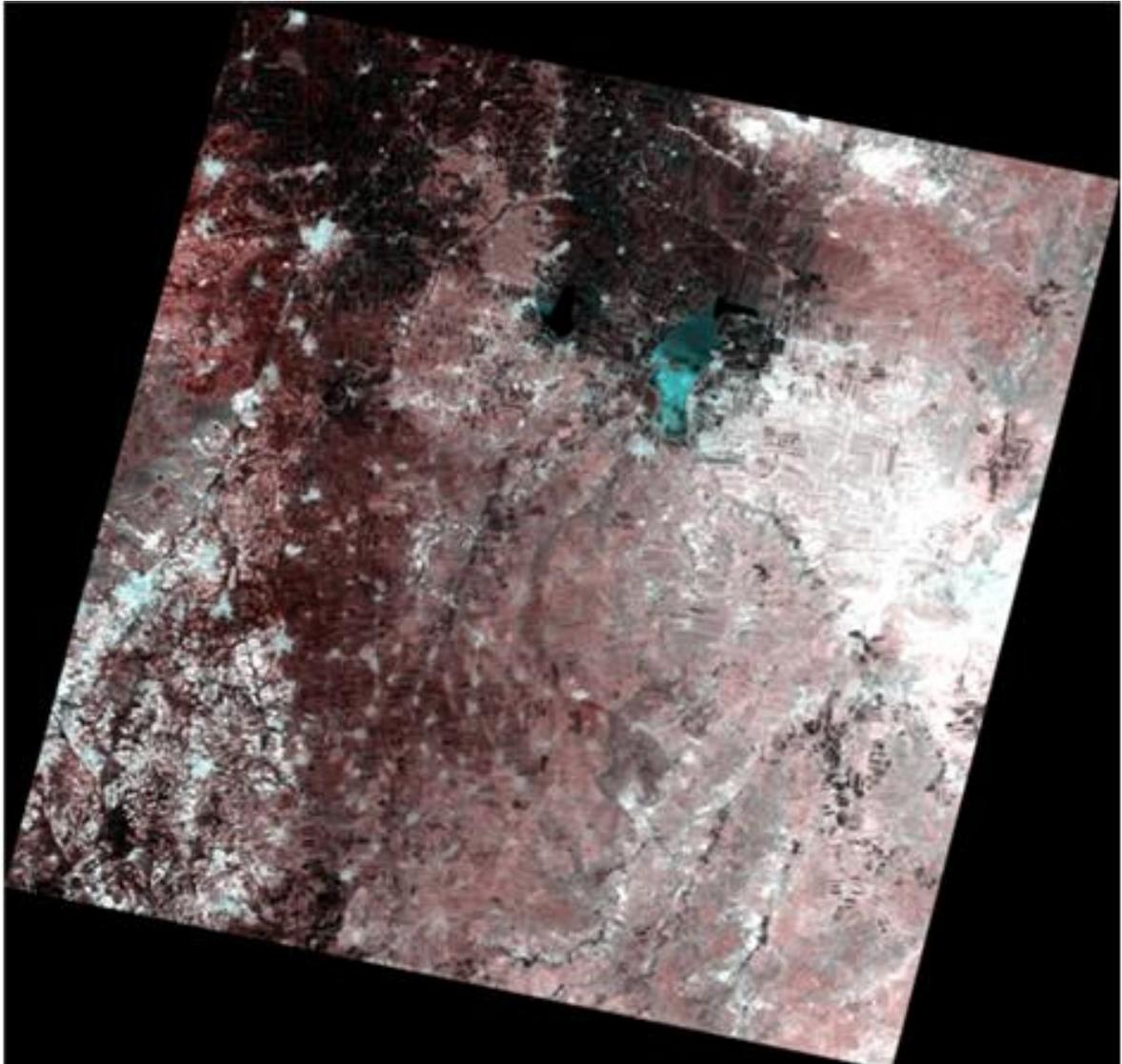


Figura 64. Immagine Aster ortorettificata e visualizzata a colori reali

Dal punto di vista morfologico l'area in esame risulta situata all'interno dell'altopiano semiarido.

Per eseguire la classificazione, si sono inizialmente individuate le principali coperture presenti, definendo quindi un numero limitato di classi tematiche.

In analogia con le elaborazioni precedentemente effettuate, nella definizione delle aree d'addestramento si è riscontrata la problematica della variabilità spettrale all'interno di una medesima classe tematica, in particolar modo per le superfici coltivate e non.

Nella tabella seguente sono indicate le classi tematiche individuate, attraverso le quali si è ottenuta la

mapa tematica successivamente riportata.

COLORE	DESCRIZIONE
Rosso	Urbanizzato
Verde chiaro	Campi coltivati
Blu	Corpi idrici
Giallo	Suolo nudo e campi non coltivati
Ciano	Rilievi interni calcarei

Tabella 7. Legenda esplicativa della mappa tematica sotto riportata

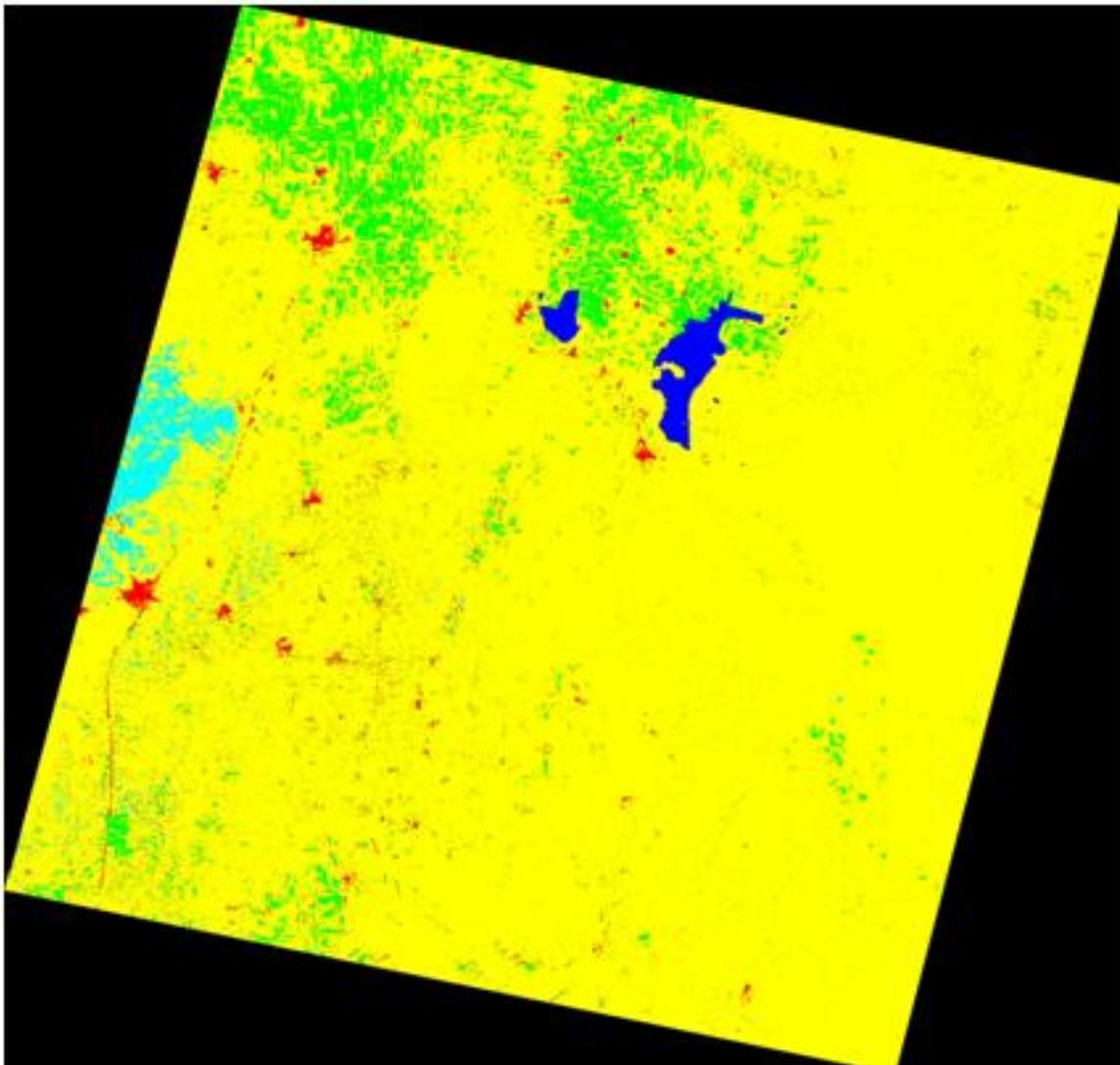


Figura 65. Classificazione dell'immagine ASTER

Come visto in precedenza, alla classificazione così prodotta sono state applicate le tecniche di post – classificazione e l’immagine risultante è stata successivamente esportata all’interno del software Google Earth, al fine di verificarne la sovrapposibilità. Come già constatato per l’immagine Landsat, si è potuta apprezzare l’elevata rispondenza esistente fra la mappa tematica generata e la “realtà a terra” rappresentata da Google Earth.

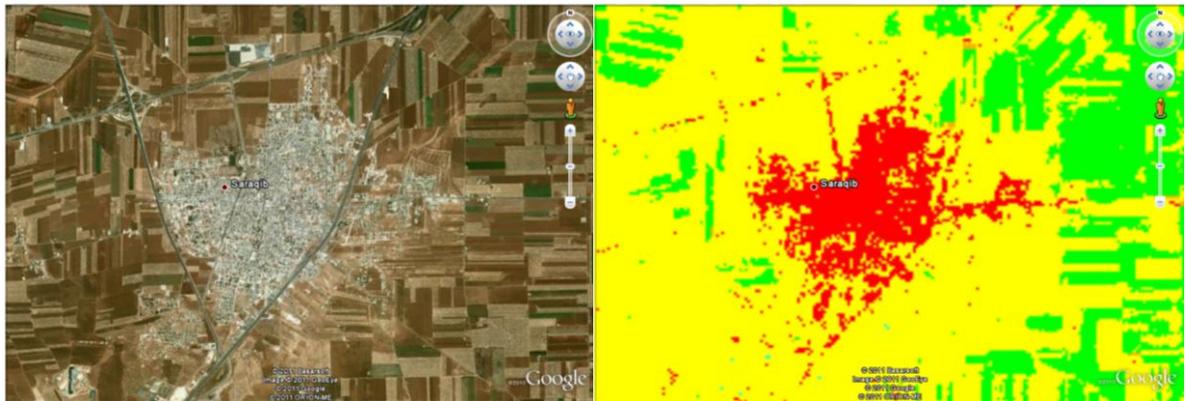


Figura 66. Saraqib

Sulla base della dimensione dell’immagine ASTER è stato definito un layer vettoriale, in maniera tale da ritagliare l’immagine Landsat inizialmente presa in esame per eseguire una nuova fotointerpretazione ad una scala più dettagliata.

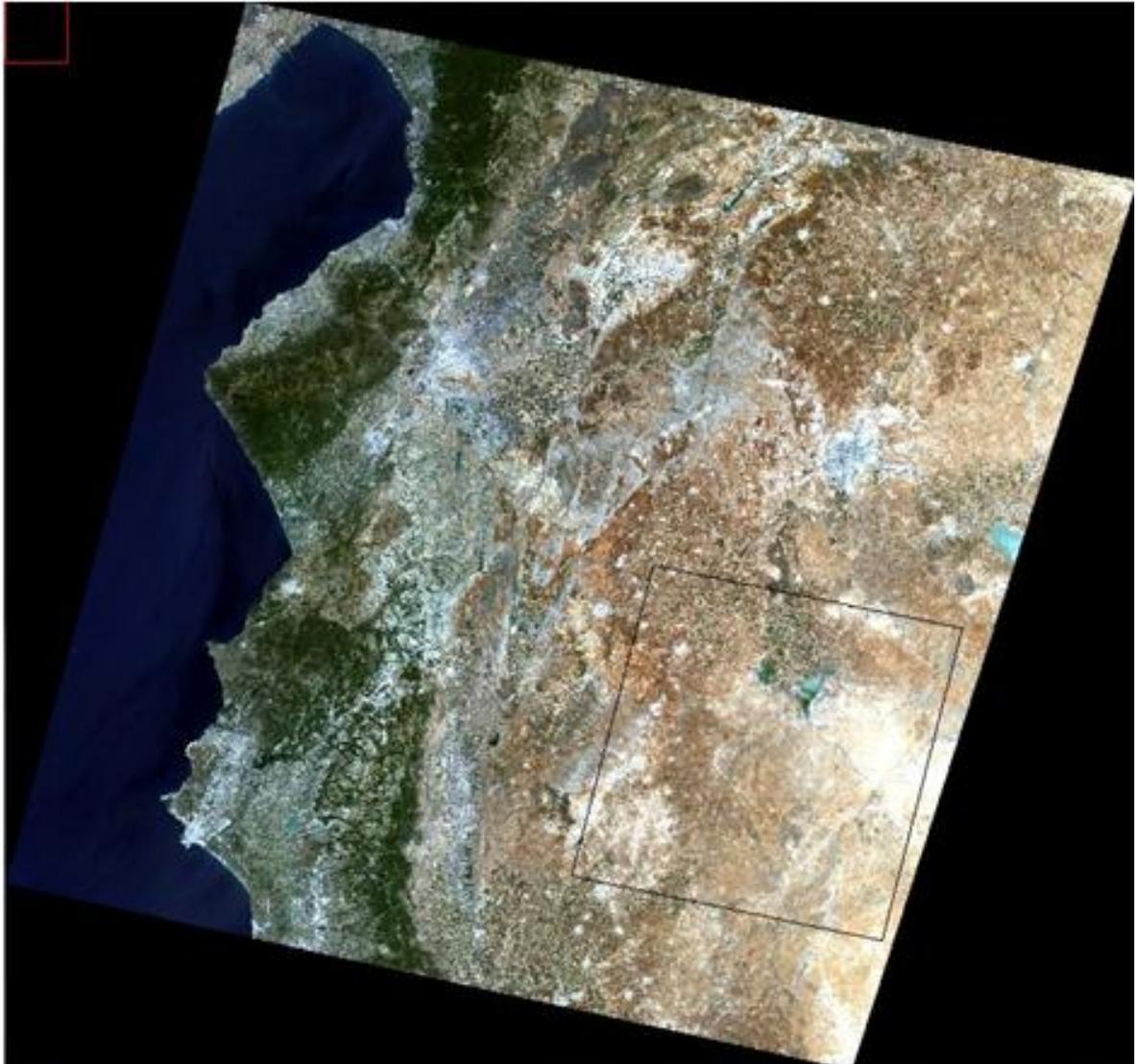


Figura 67. Immagine Landsat appartenente alla collezione GLS 2005 con evidenziata in nero l'area dell'immagine ASTER

Tale elaborazione ha anche permesso di valutare il grado di sovrapposizione fra le mappe tematiche prodotte a partire da immagini acquisite da due tipologie di immagini satellitari differenti. Si specifica che, invece di eseguire semplicemente un subset spaziale della mappa tematica precedentemente ottenuta, si è scelto di fotointerpretare l'immagine con le nuove dimensioni, al fine di produrre una classificazione maggiormente rappresentativa e meglio comparabile con quella ASTER.

Per permettere un confronto il più possibile significativo sono state utilizzate immagini acquisite in un periodo analogo; in particolare l'immagine ASTER risale al 25/05/2007, ossia all'incirca un mese prima rispetto all'immagine Landsat, datata 26/06/2007. Inoltre, per eseguire l'ortorettifica dell'immagine ASTER, i pixel sono stati ricampionati con una risoluzione spaziale pari a 30 m, la stessa delle immagini Landsat, proprio per permettere un confronto "alla pari" fra le due mappe tematiche risultanti.

Per eseguire la classificazione, si sono inizialmente utilizzate le medesime classi tematiche individuate per l'immagine ASTER; sulla base della legenda precedentemente riportata si è quindi ottenuta la seguente mappa tematica.

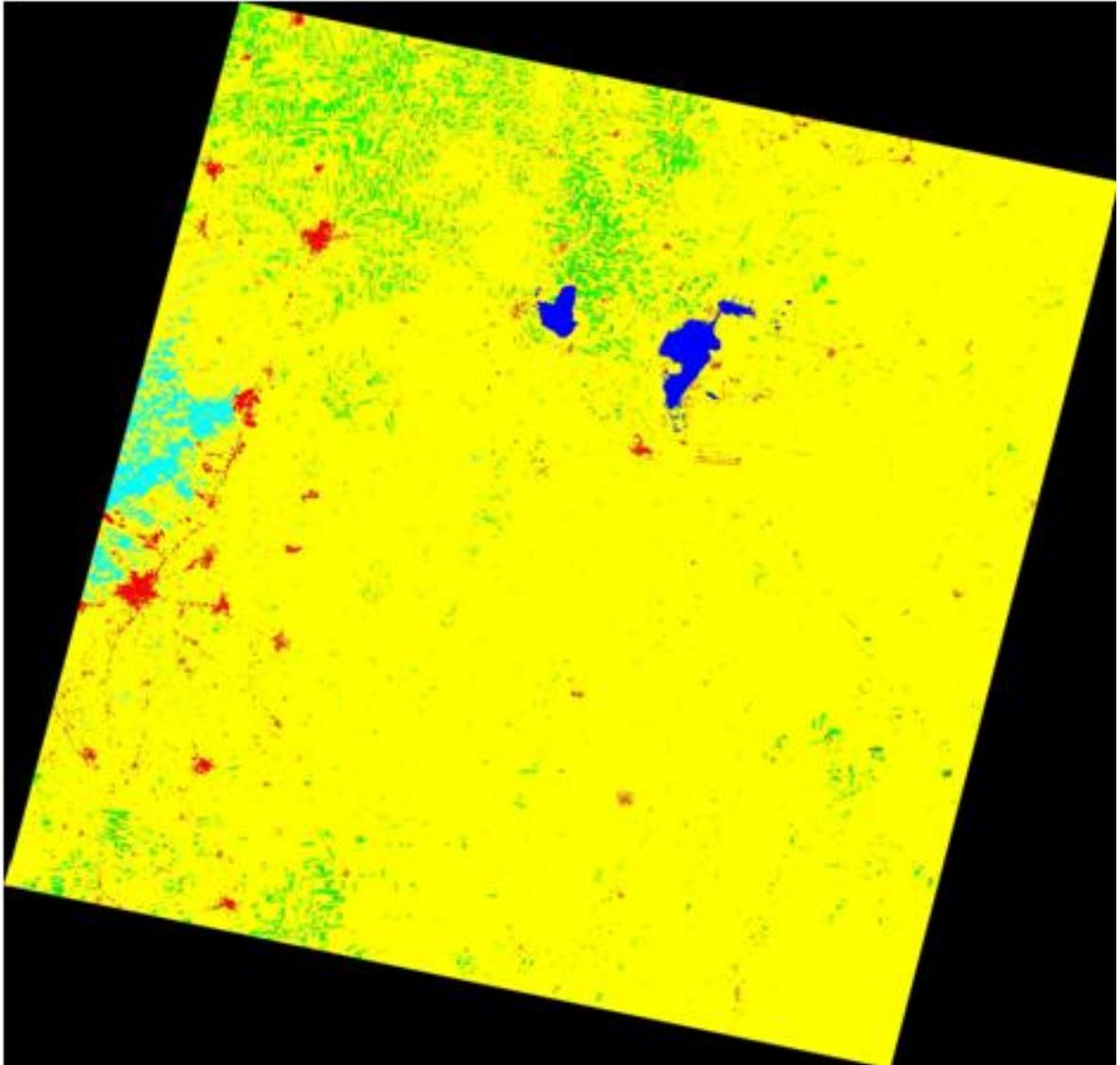


Figura 68. Classificazione ottenuta dall'immagine Landsat

Per valutare la sovrapposizione e la corrispondenza fra le classificazioni prodotte si sono quindi comparate le mappe tematiche derivanti dall'immagine ASTER e dall'immagine Landsat.

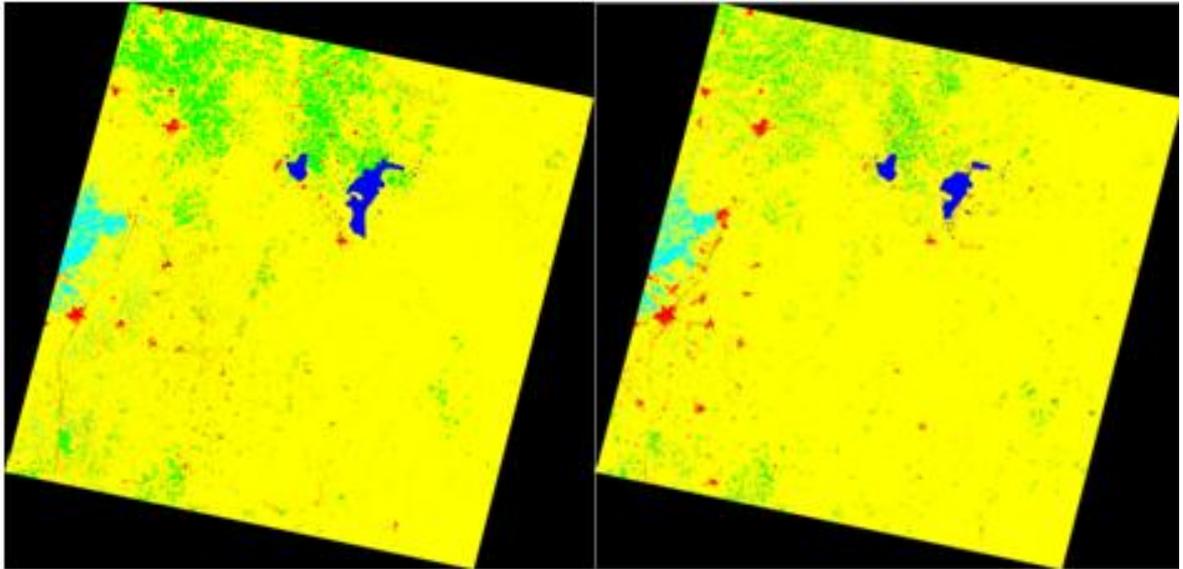


Figura 69. Confronto fra la classificazione ottenuta dall'immagine Aster, a sinistra e dall'immagine Landsat, a destra

Le principali differenze che subito risaltano dal confronto fra le due mappe tematiche riguardano la differente individuazione delle zone urbanizzate e la diversa distribuzione delle aree coltivate, in quantità superiore nell'ASTER rispetto alla Landsat. Tale fenomeno può d'altra parte essere spiegato con la distanza temporale che intercorre fra le due immagini e conseguentemente con il differente stato delle colture in un periodo di intensa crescita vegetativa.

Una conferma a quest'ipotesi è fornita dalla fotointerpretazione delle due immagini visualizzate a falsi colori infrarossi.

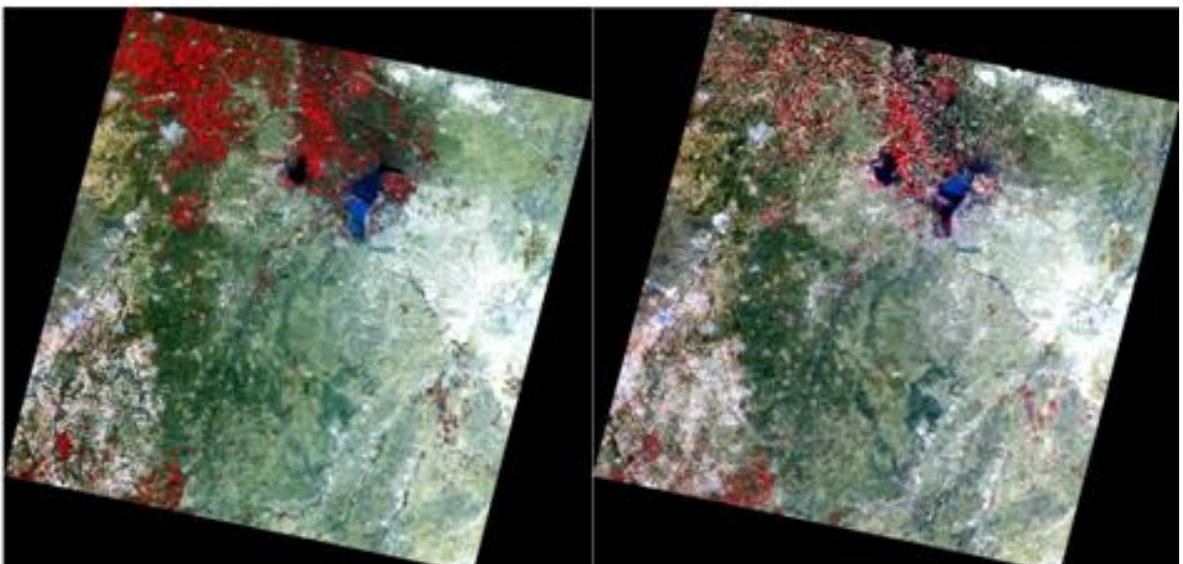


Figura 70. Confronto fra l'immagine Aster, a sinistra, e Landsat, a destra, entrambe visualizzati in modalità a falsi colori infrarossi

Nell'immagine ASTER, riportata a sinistra, è infatti ben visibile la presenza di zone vegetate che, sulla base delle informazioni di letteratura, vengono rappresentate in molteplici sfumature e tonalità di rosso; nell'immagine Landsat, al contrario, tali zone risultano molto meno diffuse ed attenuate.

Di seguito si riportano alcune schermate comparative fra le due mappe tematiche, dopo averle entrambe sottoposte ai trattamenti di post – classificazione, riportando a sinistra l'immagine ASTER ed a destra l'immagine Landsat.

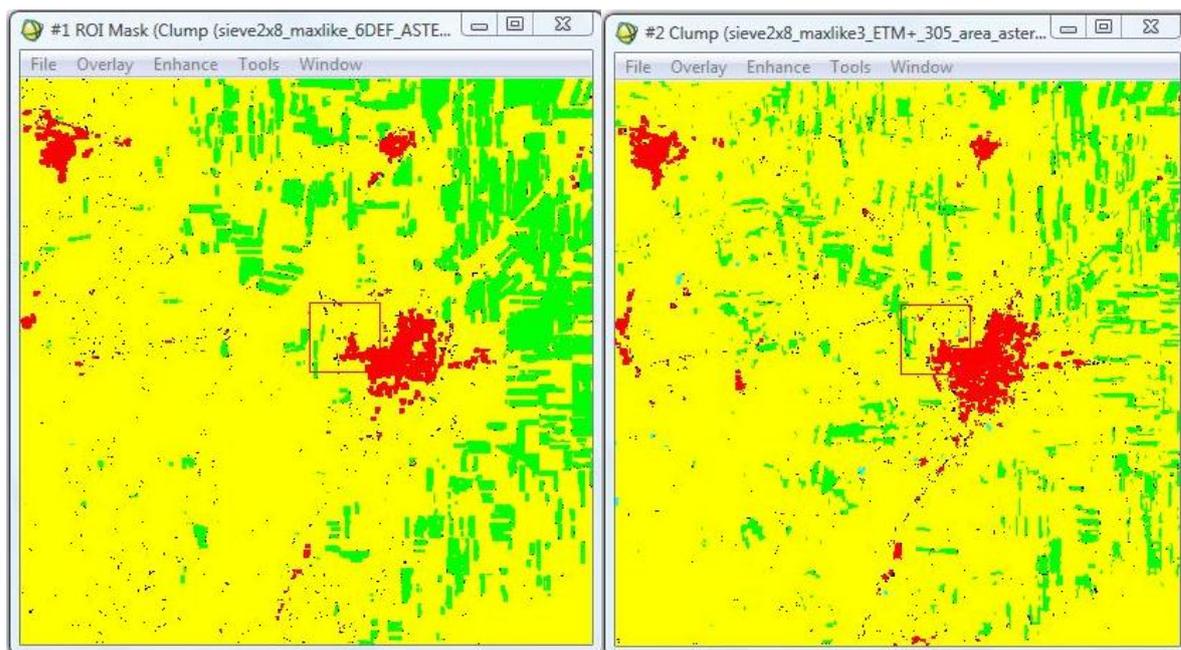


Figura 71. Saraqib

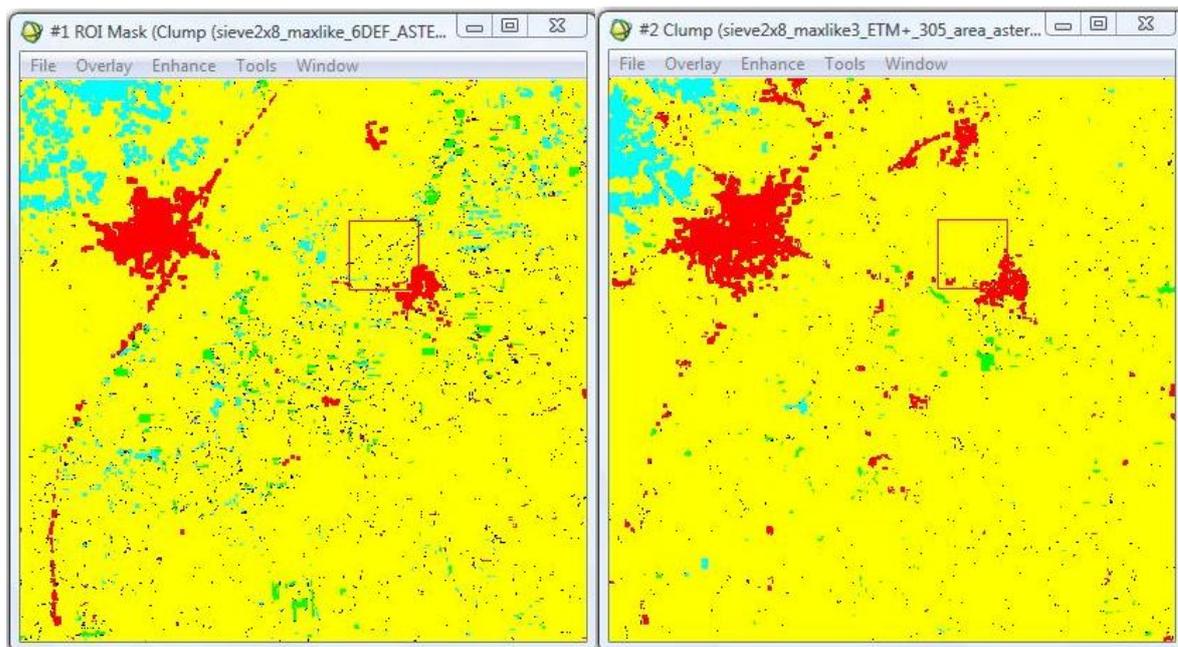


Figura 72. Ma'arrat al - Nu'man

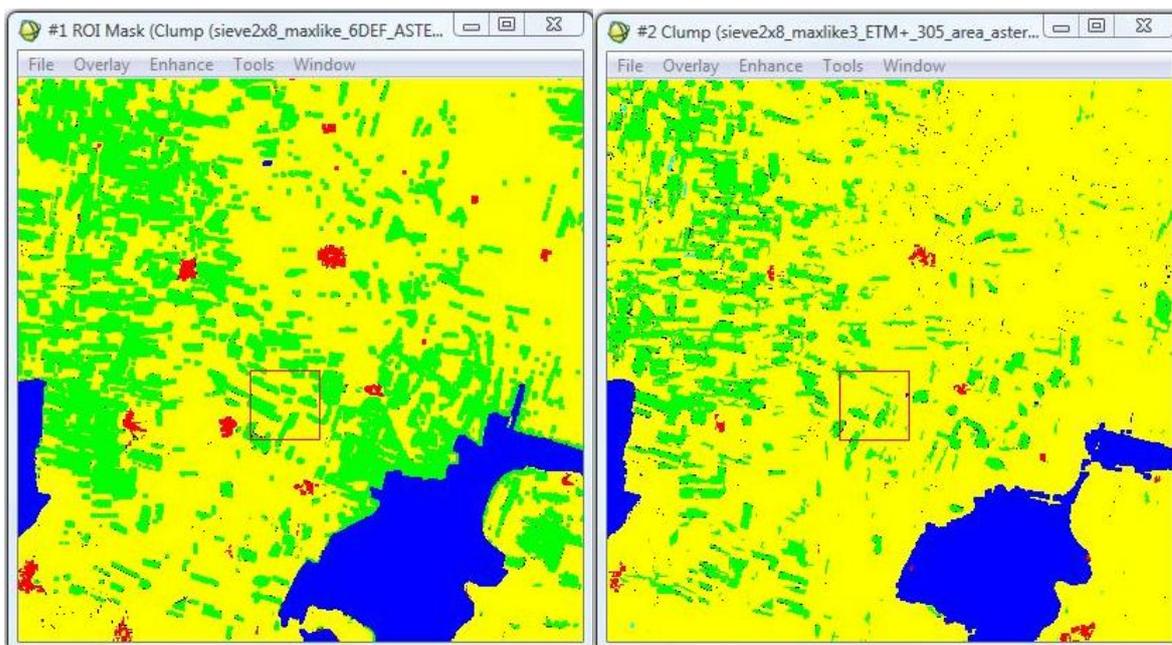


Figura 73. A sinistra la classificazione dell'immagine Aster, a destra quella dell'immagine Landsat nei pressi di Tell Sultan

Utilizzando la classificazione ottenuta attraverso l'immagine Aster è interessante mettere in evidenza un tipico effetto prodotto dalle tecniche di post – classificazione, che consiste nella perdita di dettagli, dovuta all'omogeneizzazione dell'immagine. Nel confronto fra l'immagine classificata, riportata a sinistra, e quella post – classificata, a destra, è infatti ben visibile la parziale perdita del reticolo stradale dovuta all'applicazione delle tecniche di post classificazione.

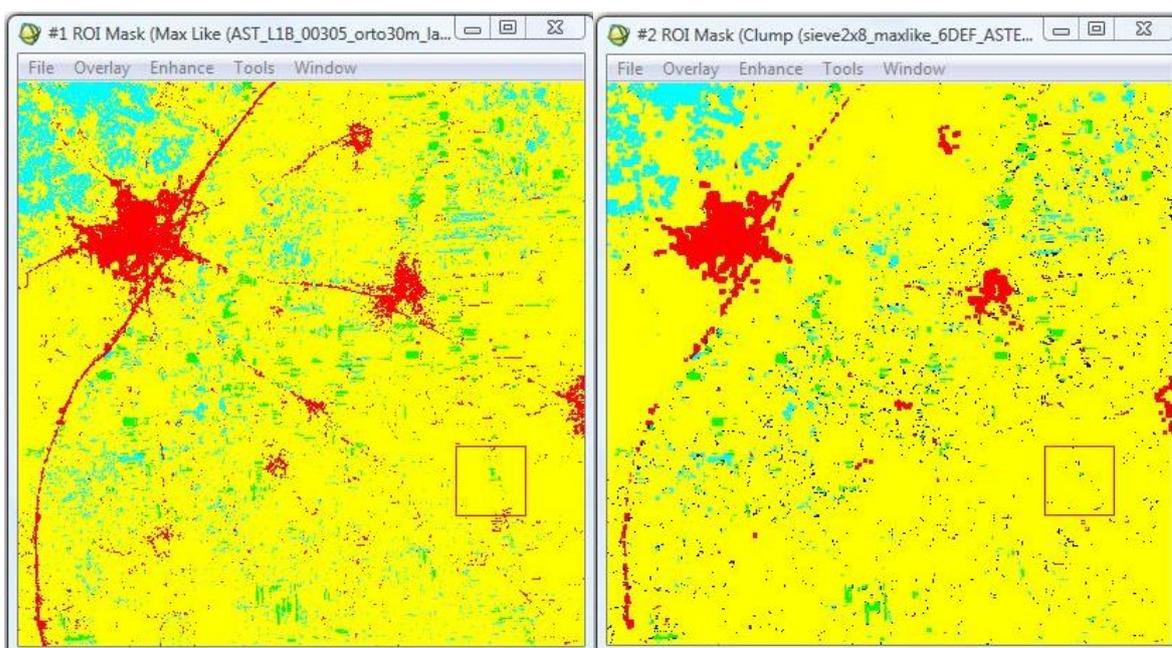


Figura 74. Perdita del reticolo stradale della città di Ma'arrat al - Nu'man a seguito dell'applicazione delle tecniche di post – classificazione

Data la scala di maggior dettaglio si è anche cercato di distinguere le principali tipologie di coperture vegetali, adibite a campi coltivati, che sono presenti nell'area. In particolare, si sono potute riconoscere tre colture differenti che, a causa dell'assenza di dati a terra, non è stato tuttavia possibile associare a coltivazioni specifiche.

Tipologia di copertura vegetale	Colore di rappresentazione nell'immagine ASTER	Colore di rappresentazione nell'immagine Landsat
Vegetazione 1	Verde chiaro	Verde chiaro
Vegetazione 2	Verde scuro	Verde scuro
Vegetazione 3	Verde mare	Giallo, corrispondente a campi non coltivati

Tabella 8. Legenda esplicativa della mappa tematica sotto riportata

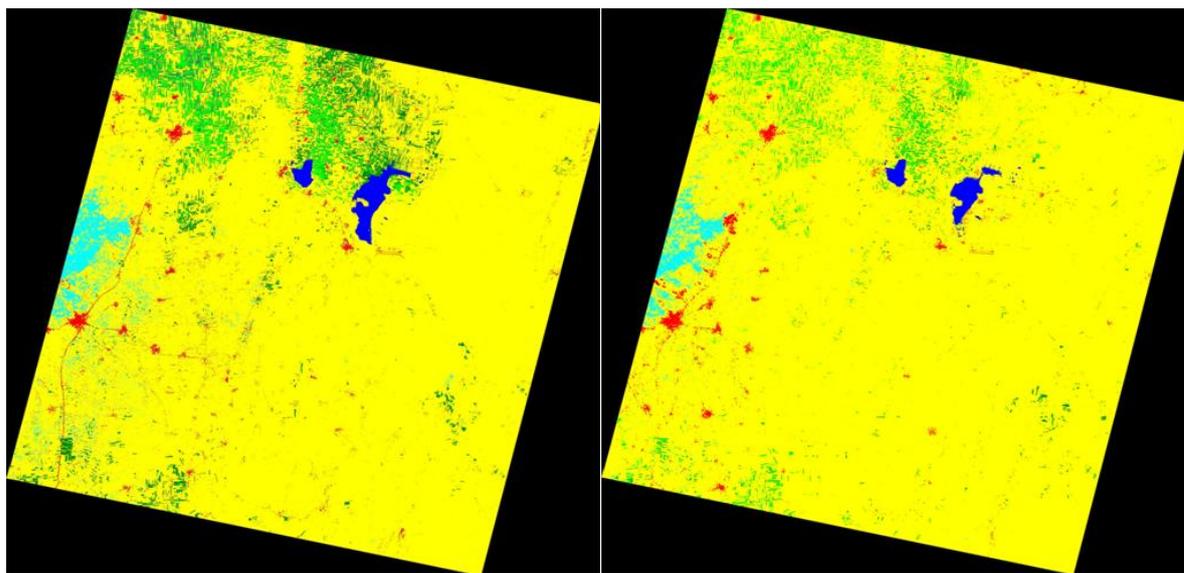


Figura 75. Mappe tematiche con distinzione fra le tre differenti tipologie di campi coltivati presenti; a sinistra per l'immagine ASTER, a destra per l'immagine Landsat

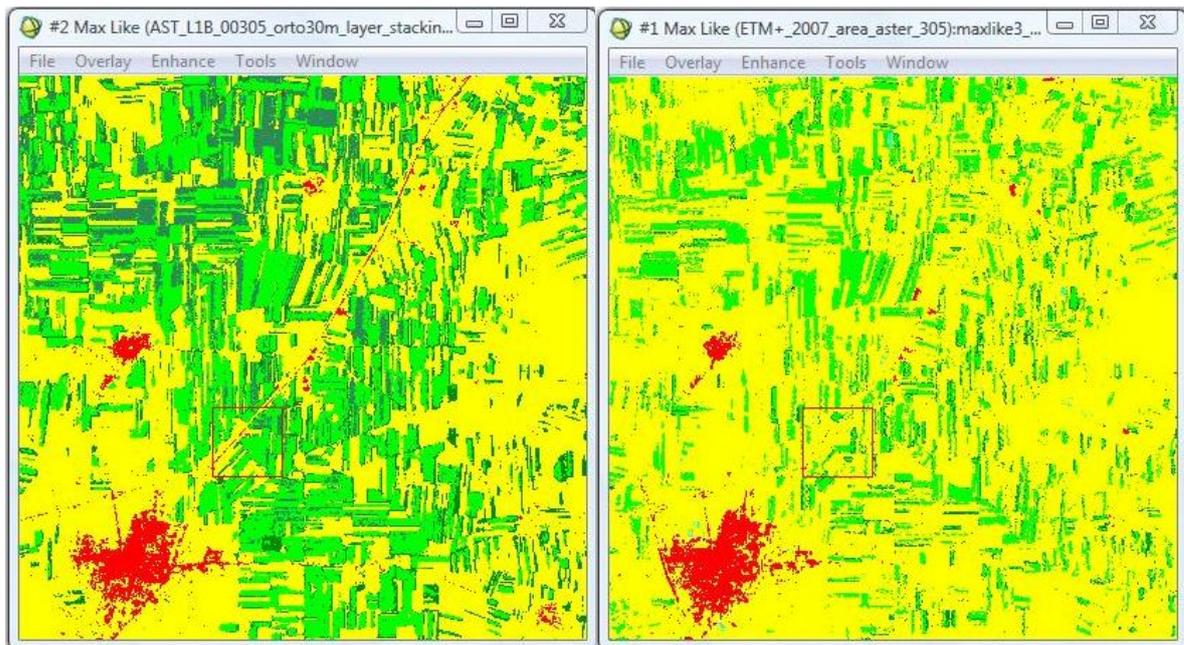


Figura 76. Dettaglio della differente distribuzione dei campi coltivati; a sinistra è riportata l'immagine ASTER, a destra l'immagine Landsat

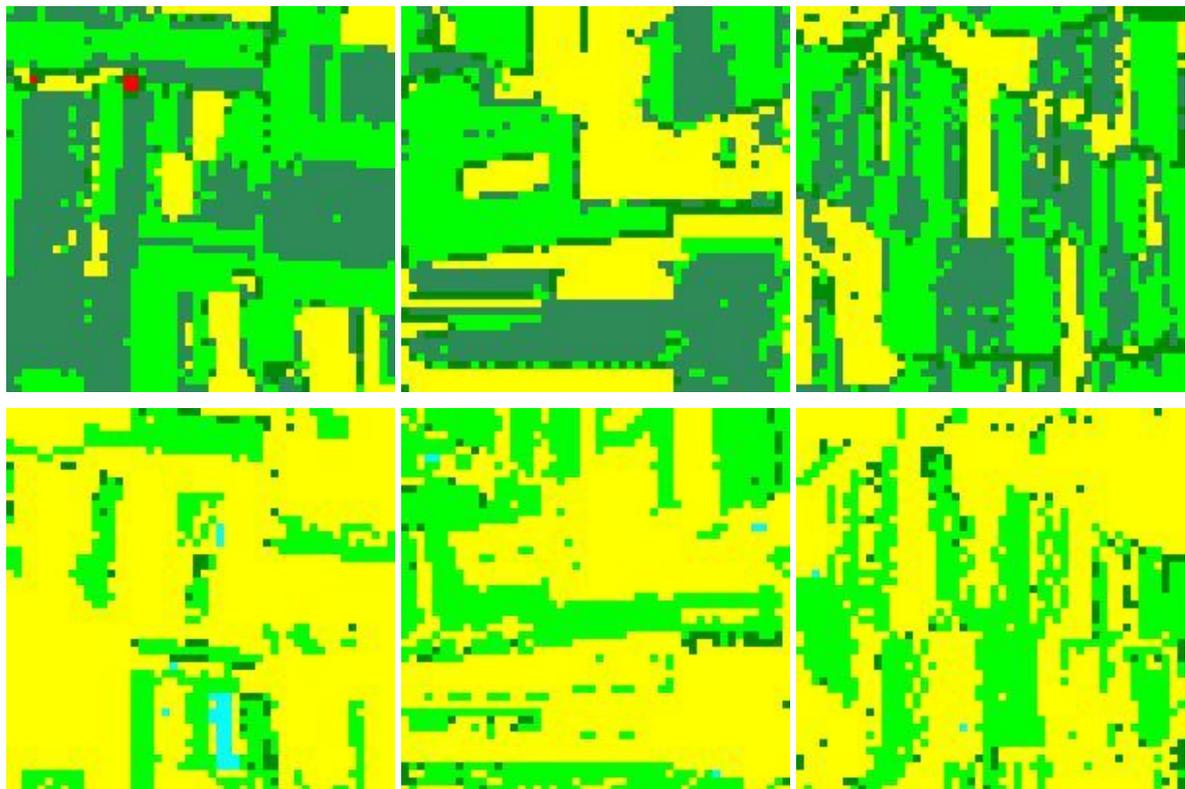


Figura 77. Dettaglio della classificazione delle colture, in alto per l'immagine ASTER in basso per l'immagine Landsat; è possibile notare come la coltura vegetale 3, rappresentata con il colore verde mare, non sia presente nella mappa tematica ottenuta dall'immagine Landsat

Infine si è anche riconosciuta una particolare tipologia di suolo nudo, in parte costituita da campi non coltivati, caratterizzata da valori di riflettanza molto elevati e che può anche essere individuata in entrambe le immagini visualizzati a colori naturali. Come già accaduto per le differenti colture individuate, a causa dell'assenza di dati a terra, non è stato possibile attribuire al suolo in esame una definita natura litologica.

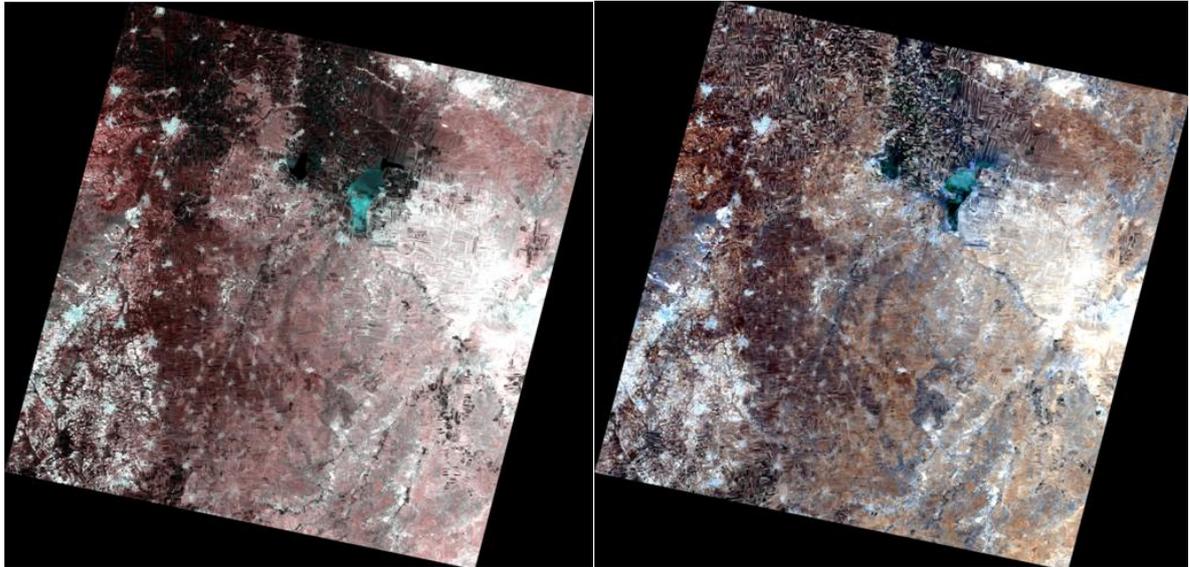


Figura 78. In entrambe le immagini, a sinistra l'ASTER ed a destra la Landsat, è riconoscibile una zona molto luminosa al centro sul lato destro

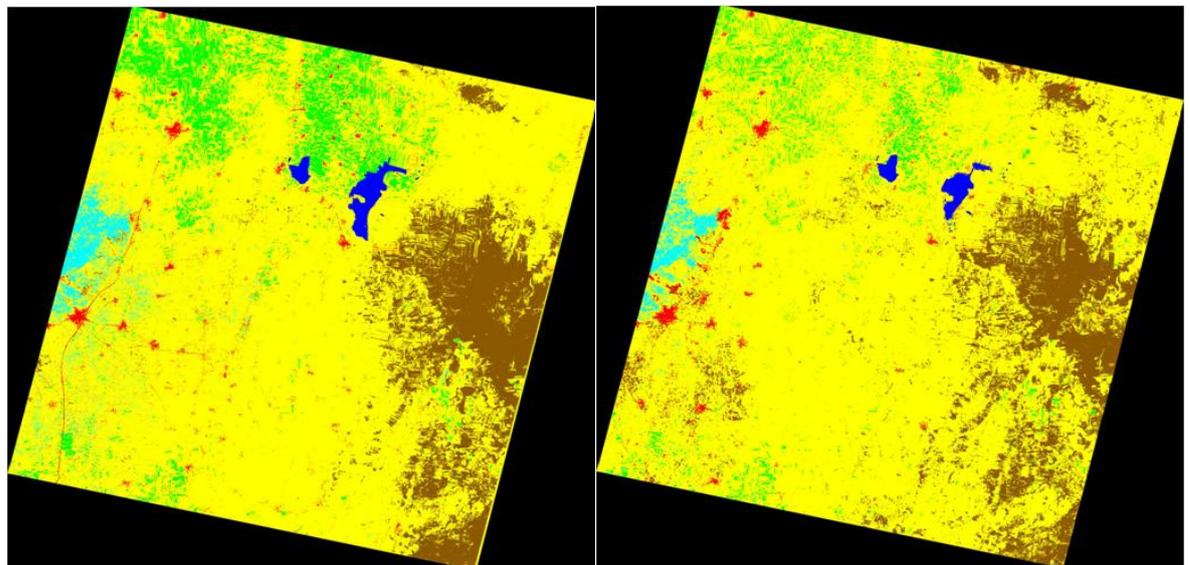


Figura 79. In entrambe le immagini classificate, a sinistra l'ASTER ed a destra la Landsat, in marrone scuro è rappresentata la tipologia di suolo in esame

Si è successivamente passati ad un'analisi a scala molto maggiore, mosaicando 4 immagini Landsat, permettendo di analizzare in maniera molto più completa e globale il territorio della Siria interna settentrionale.

7.5 Il mosaico di immagini telerilevate

La mosaicatura delle immagini telerilevate consiste nell'unire due o più immagini, generalmente georeferenziate, ottenendo così una singola immagine composita. La mosaicatura è quindi una procedura che permette di generare un'unica immagine digitale combinando molteplici immagini adiacenti.

I mosaici di immagini permettono di compensare le differenze di visualizzazione geometrica: applicando trasformazioni appropriate, attraverso un'operazione di deformazione e di fusione delle regioni di sovrapposizione delle immagini, è possibile costruire una singola immagine che copre l'intera area visibile della scena, simulando quindi la condizione in cui l'intera scena è vista da una postazione fissa con un'unica telecamera.

Le problematiche connesse alla mosaicatura delle immagini derivano dalla combinazione di tre problemi differenti:

- correzione delle deformazioni geometriche
- registrazione delle immagini
- eliminazione delle giunzioni dai mosaici di immagini

Nel caso di studio, avendo utilizzato immagini georeferenziate, corrette sia geometricamente sia radiometricamente, l'unica problematica che si è dovuta affrontare e superare riguarda l'eliminazione della linea di giunzione fra le immagini che compongono il mosaico.

7.5.1 Il mosaico di immagini in ENVI

Il software ENVI fornisce funzionalità interattive per l'immissione di immagini non georeferenziate all'interno di un mosaico e per il posizionamento automatico di immagini georeferenziate all'interno di un mosaico in uscita georeferenziato. ENVI fornisce anche una serie di funzioni specifiche dedicate alla mosaicatura delle immagini quali: la distanza di sfumatura, la trasparenza, la corrispondenza degli istogrammi ed il bilanciamento automatico del colore.

Il mosaico di immagini georeferenziate in ENVI

Attraverso la funzione Mosaicatura Georeferenzata (Georeferenced Mosaicking) il software in automatico sovrappone molteplici immagini georeferenziate e permette di impostare una serie di parametri per la costruzione del mosaico.

Per la costruzione del mosaico sono state utilizzate quattro immagini acquisite, a distanza ravvicinata, dal satellite Landsat 5 ed appartenenti a due strisciate adiacenti:

- le immagini di sinistra sono state acquisite il 23/06/2009
- le immagini di destra sono state acquisite il 16/06/2009

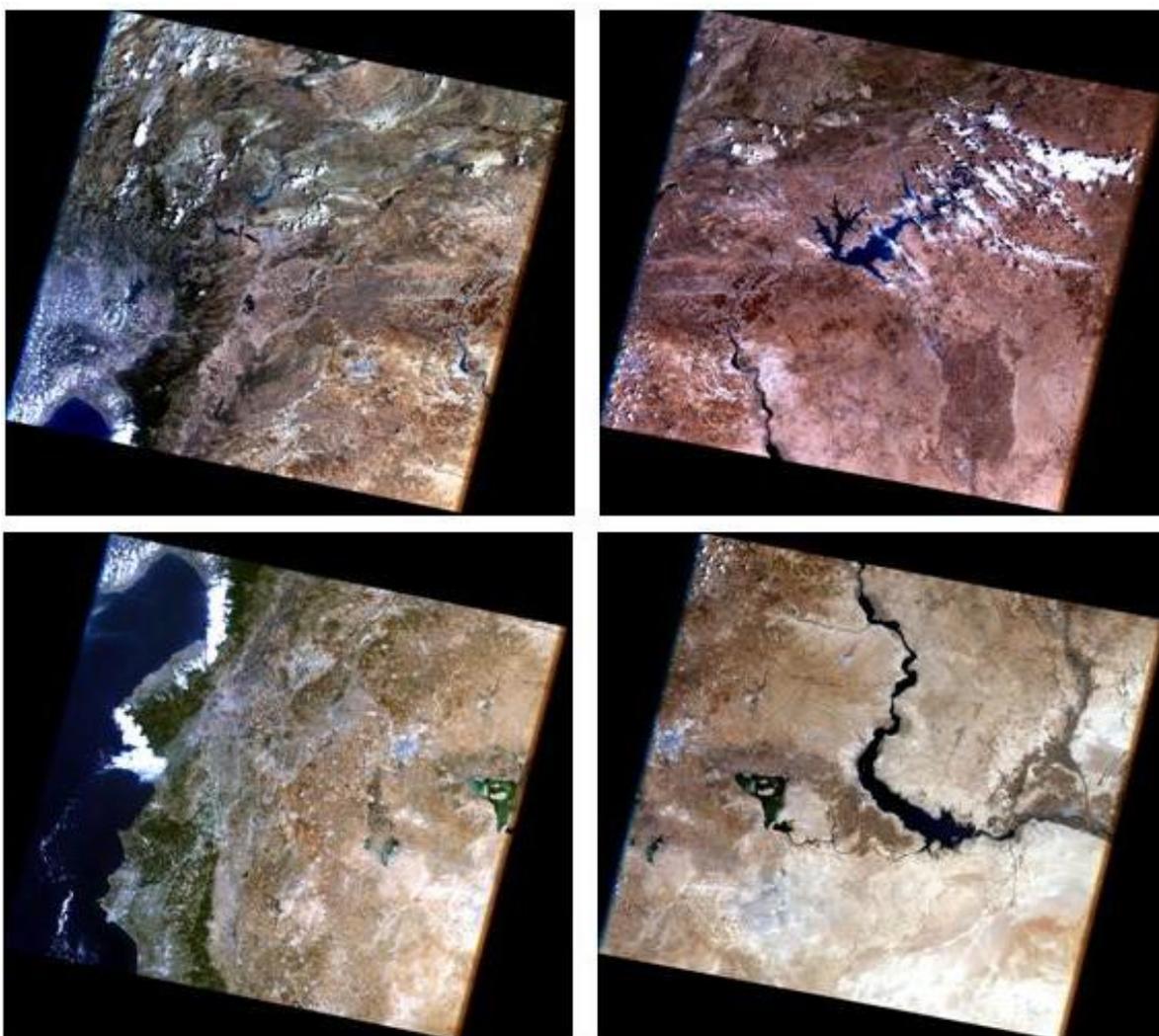


Figura 80. Visualizzazione a colori reali delle quattro immagini Landsat 5 TM utilizzate per la costruzione del mosaico

Ai fini del proseguo del seguente elaborato si è adottata la numerazione, riportata nella tabella sottostante, per la distinzione delle immagini.

<i>2</i>	<i>3</i>
<i>1</i>	<i>4</i>

L'unica elaborazione effettuata su ciascuna immagine, preliminarmente all'esecuzione del mosaico, è consistita nel ritaglio di una fascia ristretta lungo i margini, al fine di eliminare eventuali effetti di bordo presenti nelle singole immagini.

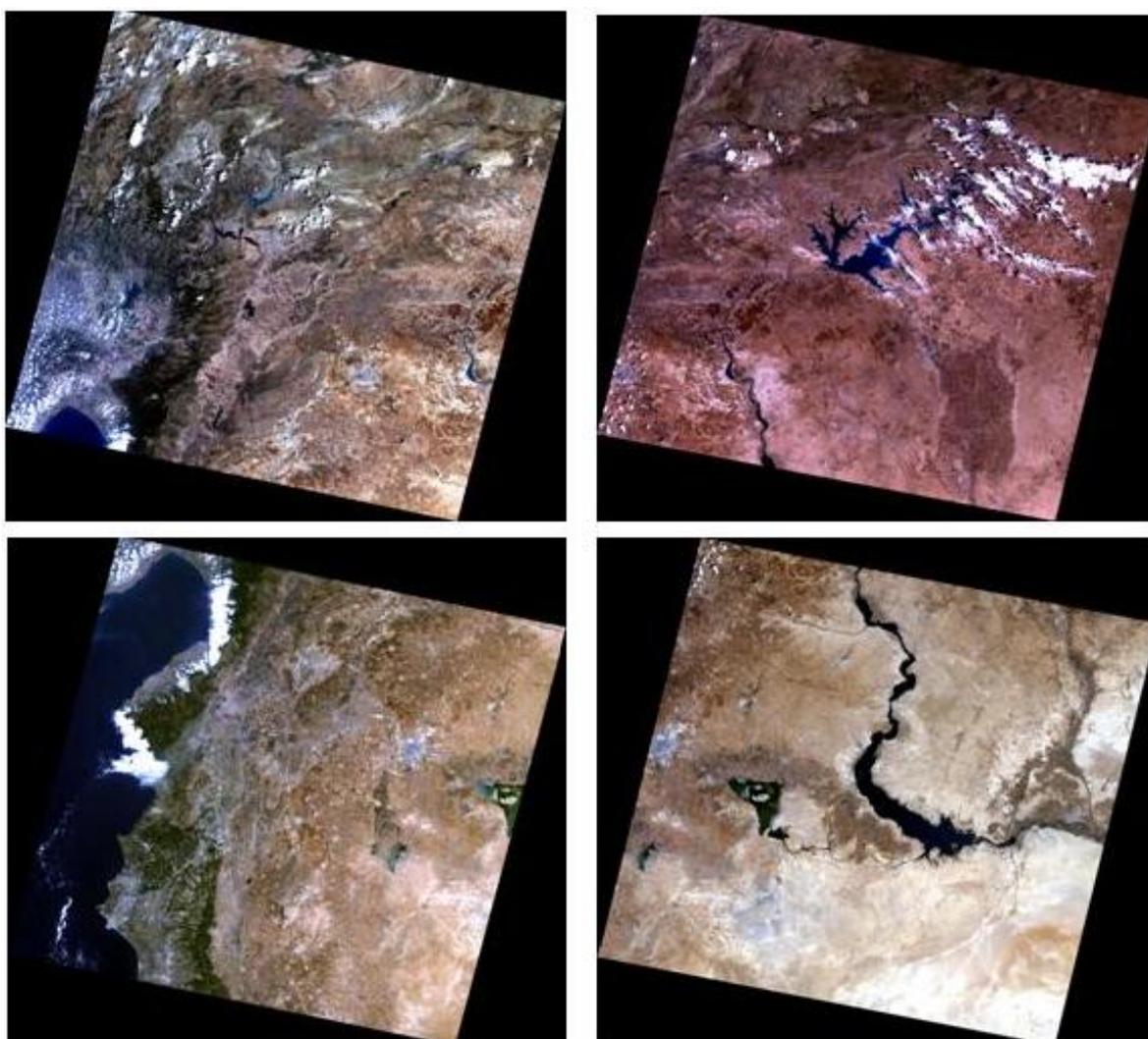


Figura 81. Immagini ottenute a seguito del ritaglio dei margini

Per la realizzazione del mosaico, si è inizialmente deciso di mosaicare tutte e quattro le immagini in contemporanea, inserendole all'interno dell'interfaccia "Map Based Mosaic" con la seguente configurazione: 4 – 3 – 2 – 1.

L5TM_2	L5TM_3
L5TM_1	L5TM_4

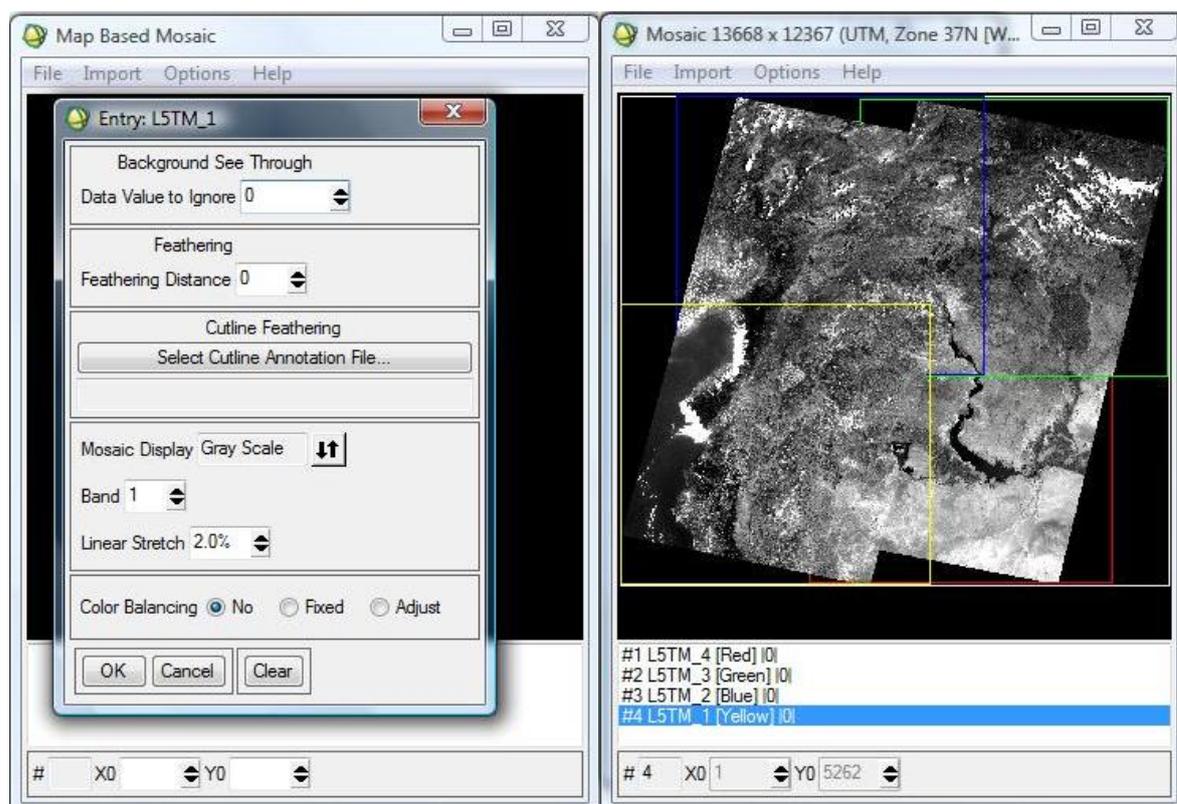


Figura 82 Importazione delle immagini ed impostazione dei parametri per la mosaicatura

Risultano quindi perfettamente definite sia la disposizione sia l'ordine di visualizzazione che le immagini avranno nel mosaico finale.

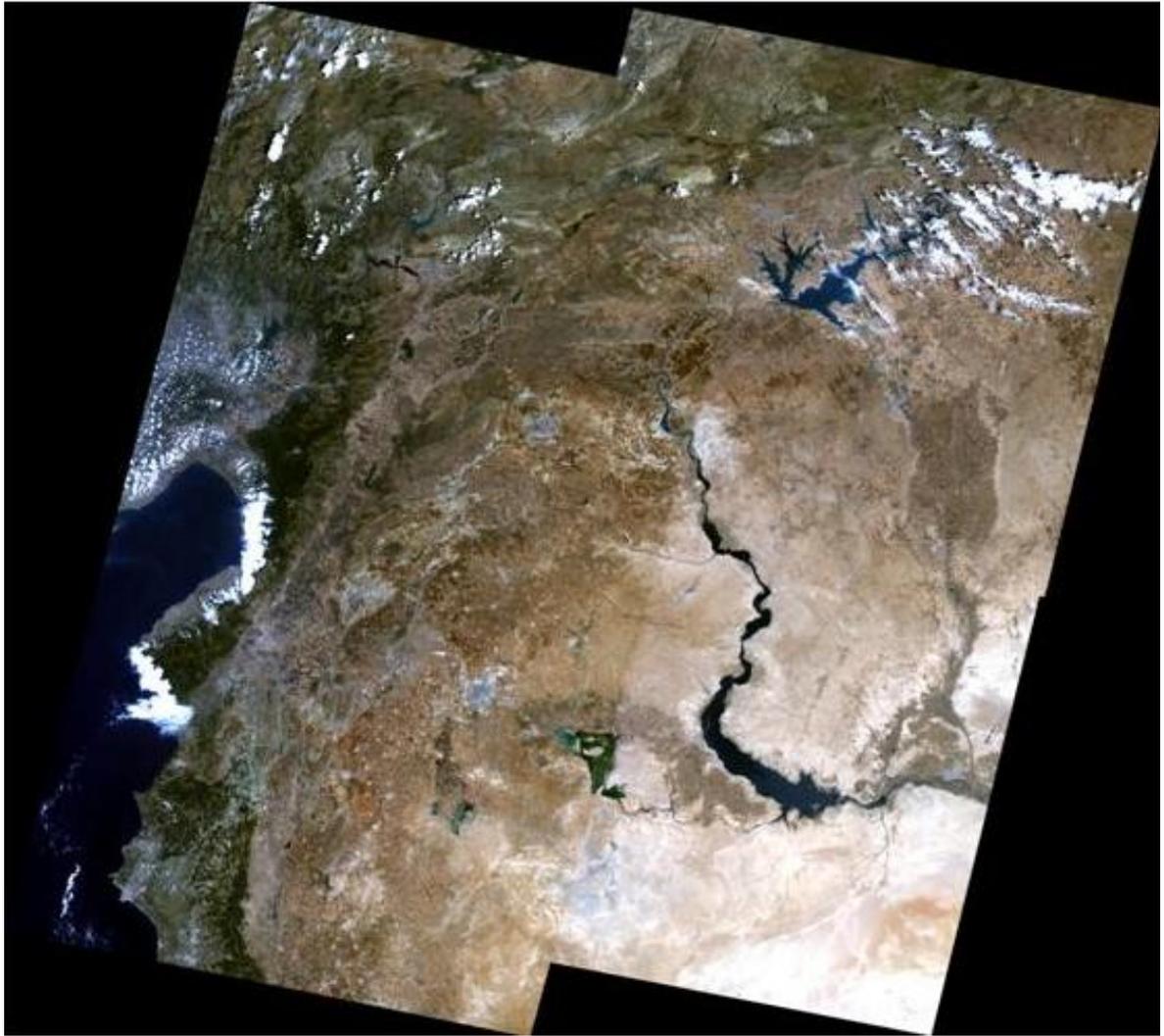


Figura 83. Mosaico risultante dalla fusione delle quattro immagini sopra riportate



Figura 84. Dettaglio della linea di giunzione fra le due strisciate

Mosaicando immagini appartenenti alla medesima strisciata, non si è presentato alcun tipo di problematica, poiché le condizioni di ripresa (atmosferiche, di illuminazione, di geometria, di assetto della piattaforma e di calibrazione del sensore, ecc.) sono ovviamente le medesime. Sovrapponendo invece le immagini appartenenti alle due strisciate differenti, si è dovuto risolvere il problema relativo all'eliminazione della linea di giunzione fra le due strisciate.

Per poter eliminare tale “difetto”, si sono inizialmente utilizzate le funzioni specifiche del tool dedicato al mosaico, ed in particolare si è lavorato sulle due seguenti funzionalità:

- distanza di sfumatura: per fondere le giunture tra le due immagini mosaiccate è possibile sfumare i bordi delle aree di sovrapposizione utilizzando la sfumatura lungo un bordo o una linea di taglio ad una distanza specificata; l'immagine in basso viene tenuta fissa mentre le immagini che si sovrappongono vengono importate con i parametri di sfumatura
- bilanciamento automatico del colore: permette di far corrispondere le statistiche di un'immagine ad un'altra, o a molte altre, per uguagliare l'intervallo di dati tra diverse immagini; gli incrementi e gli offset vengono calcolati, banda per banda, dall'immagine fissa ed applicati alle immagini da correggere in modo che le immagini regolate finiscono con lo stesso range statistico. Le statistiche possono essere ottenute sia da immagini intere sia soltanto dalle aree di sovrapposizione.

Per quanto riguarda il bilanciamento del colore, si sono utilizzate entrambe le possibilità offerte dalla finestra di dialogo, utilizzando sia le sole regioni di sovrapposizione sia l'intero file per il calcolo delle statistiche. Nello specifico, le immagini 2 – 3 – 4 sono state corrette attraverso l'utilizzo dei coefficienti ricavati dall'immagine 1, che si è tenuta fissa.

Di seguito si riportano i due mosaici ottenuti applicando la funzione del bilanciamento del colore, con le statistiche calcolate, nell'ordine, sulle sole regioni di sovrapposizione e sull'intera immagine.

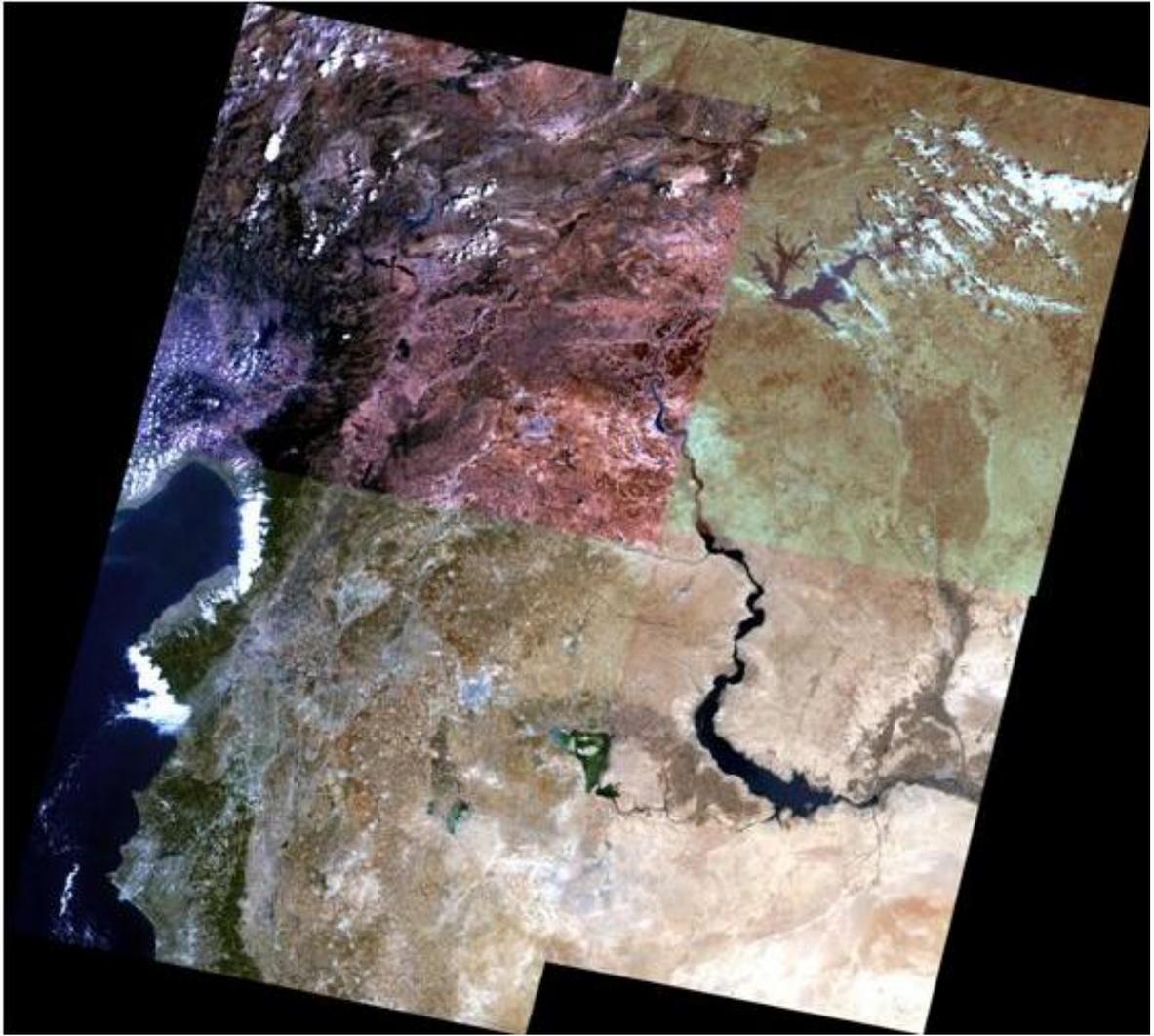


Figura 85. Mosaico ottenuto utilizzando la funzione "color balancing", impostando la sola area di sovrapposizione delle immagini per il calcolo delle statistiche



Figura 86. Mosaico ottenuto utilizzando la funzione "color balancing", impostando l'intera estensione dei files per il calcolo delle statistiche

Dalla immagini sopra riportate si evince che, utilizzando il bilanciamento del colore, i risultati della mosaicatura risultano qualitativamente inferiori rispetto a quelli ottenibili eseguendo una semplice mosaicatura. Infatti, oltre alla problematica legata alla presenza della linea di passaggio fra le due strisciate, si verifica la perdita di continuità ed omogeneità fra le due immagini che compongono la medesima strisciata.

Per ottenere una maggiore precisione nella definizione dei contorni del mosaico e nel tentativo di migliorare i risultati ottenibili con le funzione bilanciamento automatico del colore, invece di mosaicare direttamente tutte e quattro le immagini in contemporanea, si è deciso di mosaicare innanzitutto le due immagini appartenenti alla medesima strisciata. Una volta ottenuti questi due mosaici parziali, si è provveduto a mosaicarli assieme, al fine di ottenere il mosaico finale.

Come si era già potuto notare dai risultati ottenuti eseguendo le elaborazioni precedenti e come era d'altronde lecito aspettarsi per le motivazioni precedentemente sottolineate, eseguendo il mosaico delle due immagini appartenenti alla medesima strisciata, non si presenta alcuna problematica.

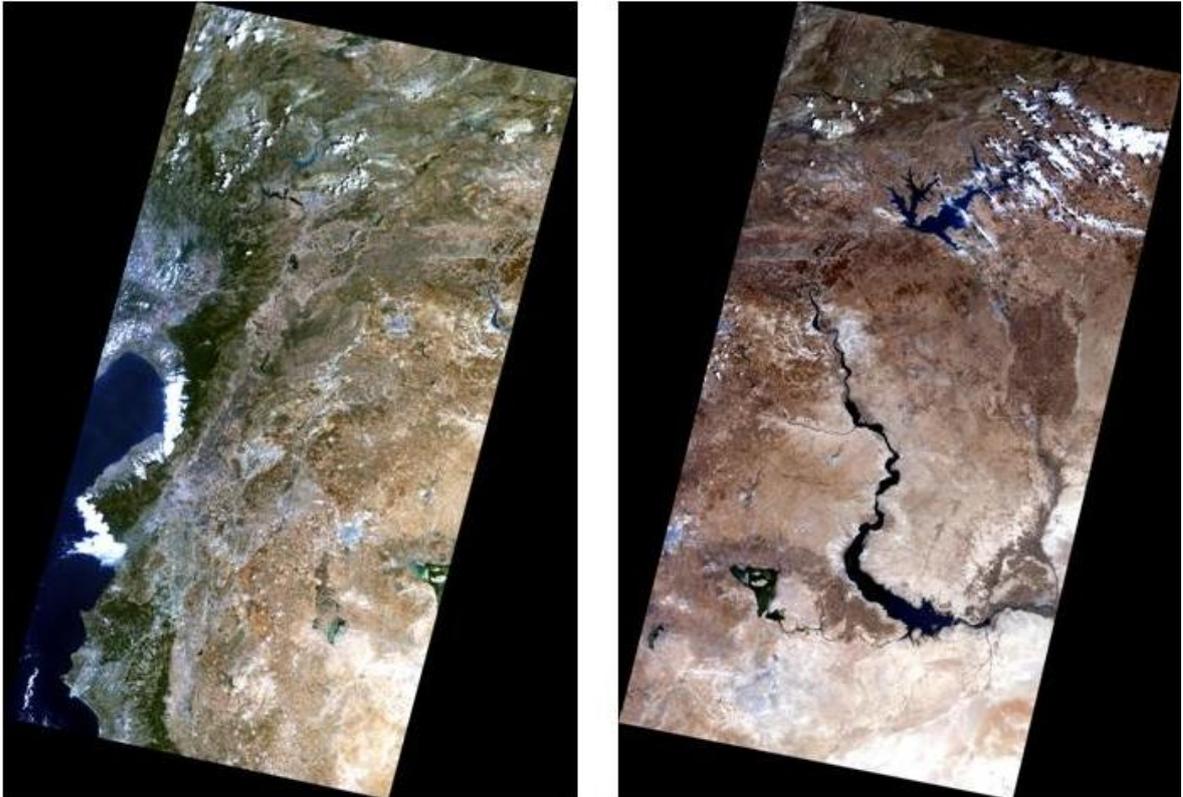


Figura 87. Mosaicatura delle due immagini che compongono la strisciata di destra e quella di sinistra

Sovrapponendo invece i due mosaici appartenenti alle due strisciate differenti, come verificatosi anche in precedenza, si è dovuto affrontare la problematica relativa all'eliminazione della linea di giunzione fra le due strisciate.

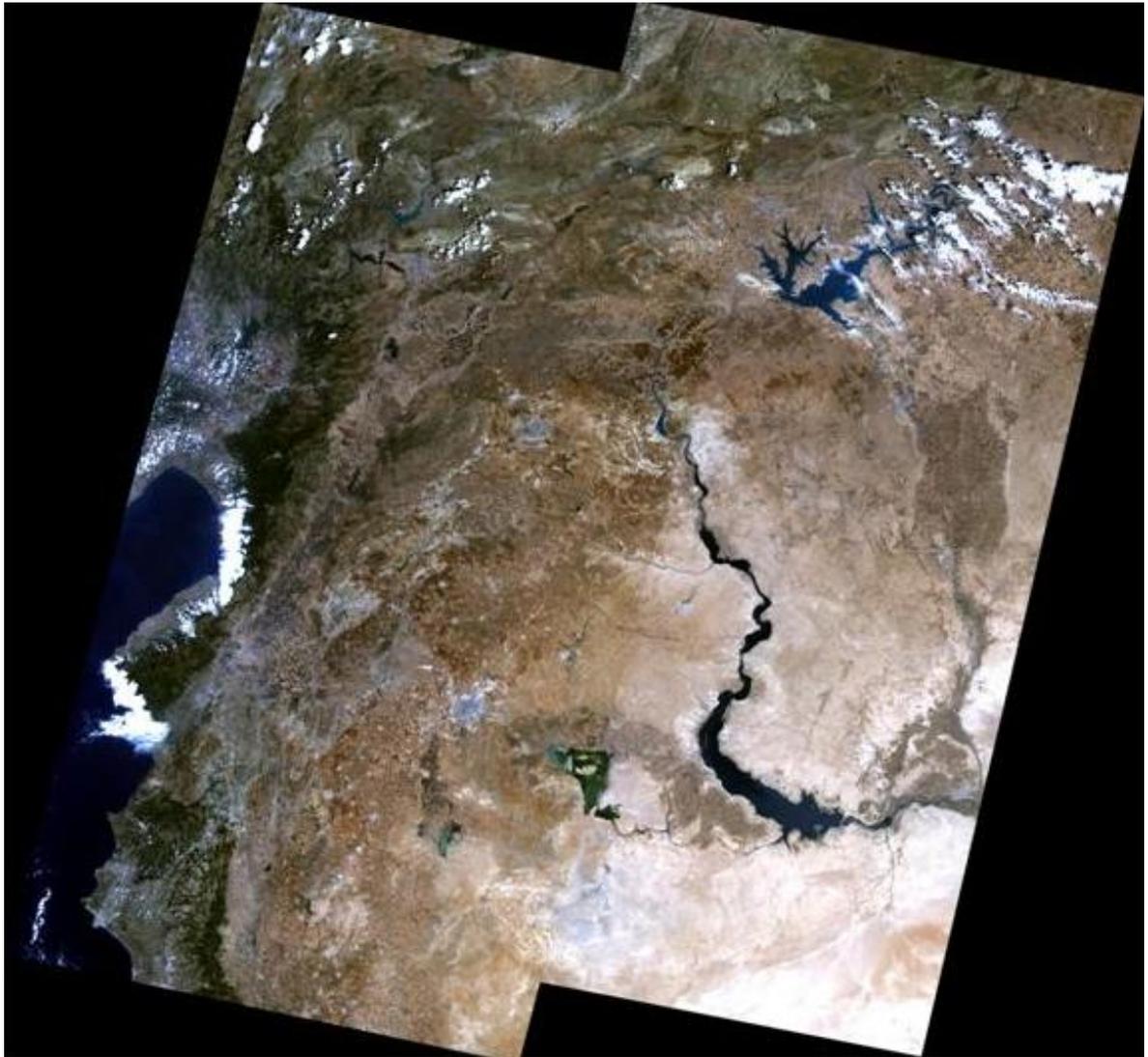


Figura 88. Mosaico risultante dalla mosaicatura delle due strisciate precedentemente mosaicate

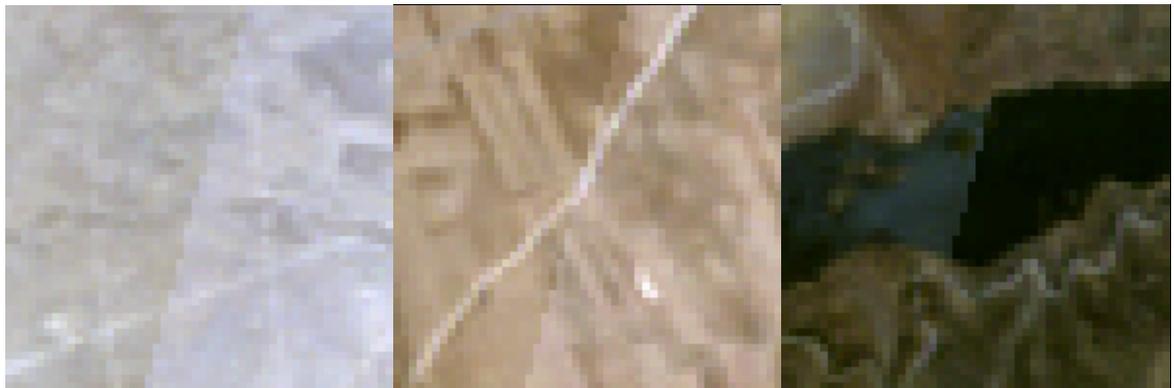
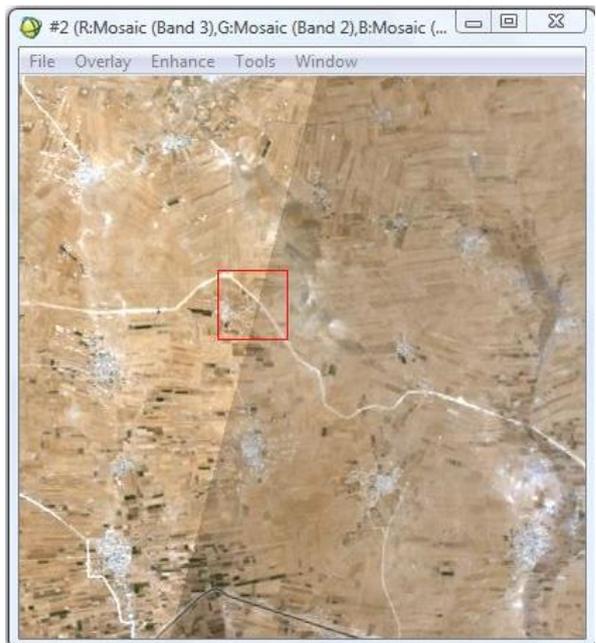
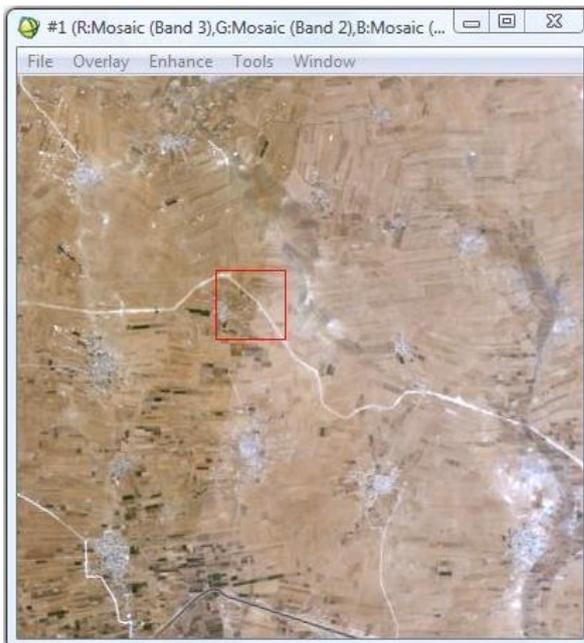
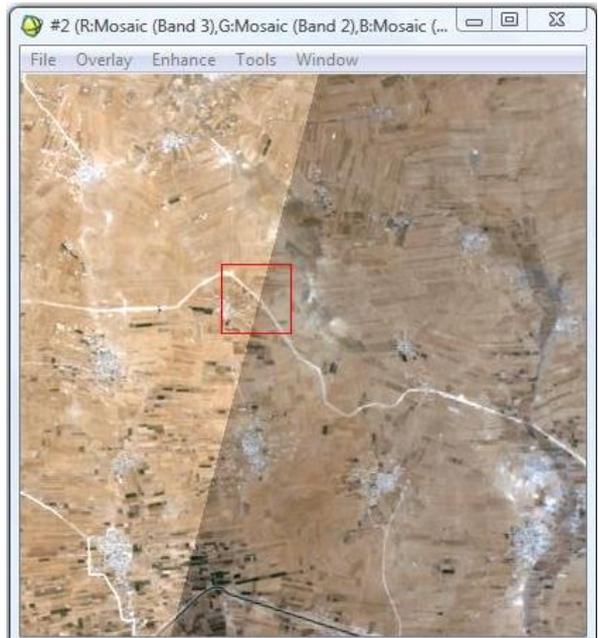
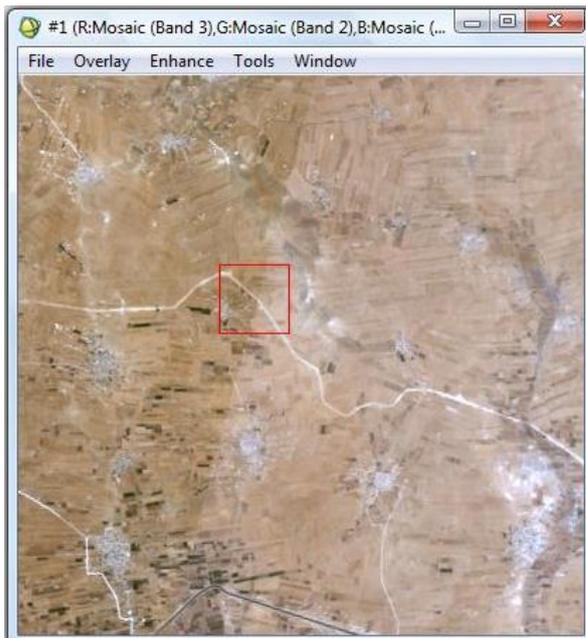


Figura 89. Dettaglio della linea di giunzione

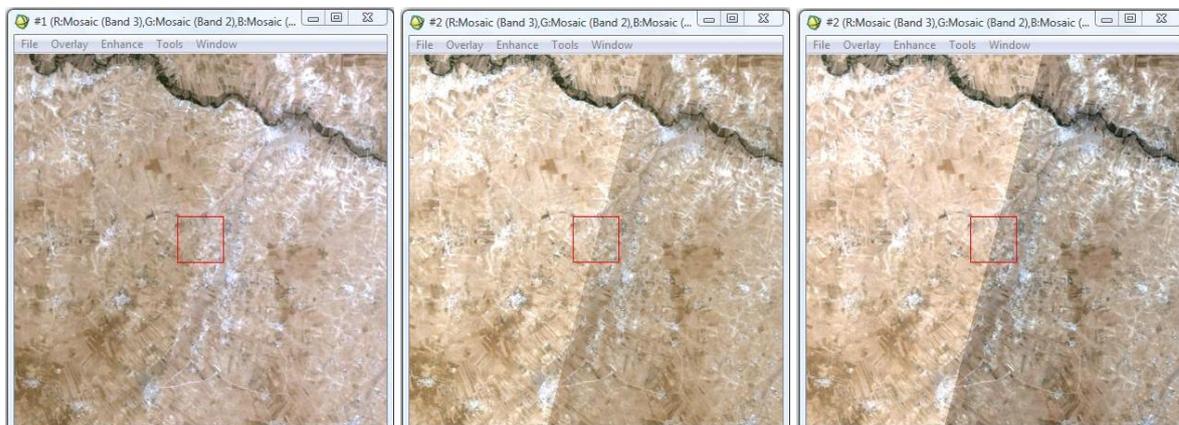
Applicando il bilanciamento del colore, con lo stesso criterio utilizzato per le elaborazioni precedenti, si sono ottenuti i risultati di seguito riportati; come in precedenza, sono riportati i due mosaici generati applicando la funzione del bilanciamento del colore, con le statistiche calcolate, nell'ordine, sulla sola area di sovrapposizione e sull'intera immagine.

Inoltre, le due tipologie di mosaico vengono confrontate con il mosaico ottenuto senza l'applicazione del bilanciamento del colore; a sinistra è riportata una schermata dell'immagine mosaicata senza bilanciamento del colore, a destra, invece, il mosaico risultante dall'applicazione del bilanciamento del colore.





Nell'immagine sottostante sono riportati i tre differenti mosaici prodotti: a sinistra il mosaico normale, al centro ed a destra i mosaici ottenuti utilizzando la funzione del bilanciamento del colore, con le statistiche calcolate, rispettivamente, sulla sola area di sovrapposizione e sull'intera immagine.



Da quanto riportato si può evincere che, nonostante l'utilizzo dei due mosaici parziali, applicando il bilanciamento del colore, si ottengono comunque risultati qualitativamente inferiori rispetto a quelli derivanti da una semplice mosaicatura. Tale funzione, tuttavia, permette di ottenere risultati migliori utilizzando, come dati di input, i due mosaici parziali invece che le quattro immagini separate.

Per poter eliminare la linea di giunzione che delimita il passaggio fra le due strisciate adiacenti, si è quindi provveduto ad effettuare manualmente la calibrazione del mosaico relativo alla strisciata di destra attraverso l'utilizzo della linea empirica (Empirical Line Calibration – ELC).

7.6 Linea di calibrazione empirica

Il metodo di calibrazione con linea empirica è una tecnica di correzione atmosferica che fornisce un'alternativa estremamente semplice ed efficace agli approcci di modellazione matematica del trasferimento radiativo. Tale tecnica permette la rimozione degli effetti atmosferici sulle immagini ottiche forzando l'andamento degli spettri delle immagini, facendo cioè corrispondere gli spettri delle immagini agli spettri di riflettanza nota raccolti sul campo.

ELC viene applicata attraverso la definizione di una regressione lineare per ogni banda facendo corrispondere i DN alla riflettanza, eliminando in tal modo la curva di irraggiamento solare, gli assorbimenti di gas in atmosfera ed il contributo della radianza di percorso (path radiance).

L'equazione seguente mostra come sono utilizzati i valori di guadagno e di offset della linea empirica, presupponendo che esista una relazione lineare tra i DN dell'immagine e la riflettanza misurata a terra:

$$\text{Riflettanza (misurata)} = \text{guadagno} \times \text{radianza (dato in input)} + \text{offset}$$

da cui, in simboli,

$$\rho_{misurata} = G \times L_{immagine} + B$$

7.6.1 Linea di calibrazione empirica in ENVI

La calibrazione con linea empirica in ENVI richiede almeno uno spettro di riferimento di campo, di laboratorio, o altro, che possa essere abbinato con la firma spettrale estratta da un pixel, o da un gruppo di pixel, in un'immagine. Per ogni banda il software ENVI estrae coppie di valori di riferimento (dagli spettri di campo) e gli fa corrispondere i DN (dei pixel dell'immagine) ed esegue una regressione lineare attraverso i punti dati.

Questa operazione permette di definire la relazione tra i DN dell'immagine ed i valori di riferimento per ogni banda attraverso due costanti: la pendenza e l'intercetta della retta di regressione. Una volta che è stata eseguita la calibrazione con la linea empirica, ENVI produce un file di testo con estensione .cff che è semplicemente un file contenente i parametri per il calcolo delle pendenze e delle intercette relative ad ogni banda.

Per ogni singolo pixel in ogni banda, quindi, ENVI utilizza i rapporti indicati da questi coefficienti per convertire un numero digitale in una riflessione, risultante nella conseguente immagine calibrata attraverso ELC; l'immagine finale in uscita è pertanto un'immagine nello "spazio riflessione" piuttosto che nello "spazio radianza".

Affinché la regressione lineare sia maggiormente accurata, è buona norma utilizzare superfici di calibrazione che siano omogenee, equamente distribuite fra regioni chiare e scure e ad un'altitudine simile, che sia il più possibile pianeggiante.

Nell'ambito di questo lavoro si è utilizzata la calibrazione con linea empirica non per effettuare una correzione atmosferica, ma per uniformare la radiometria delle due strisciate che coprono l'area oggetto di studio.

Nello specifico caso di studio, in particolare, non disponendo di punti noti a terra, si è provveduto ad individuare manualmente, nell'area di sovrapposizione fra le due strisciate, 12 punti nell'immagine di sinistra ed altrettanti 12 punti omologhi nell'immagine di destra, al fine di poter applicare la calibrazione con linea empirica, facendo calcolare al software i parametri geometrici di pendenza ed intercetta della linea empirica. In particolare, i punti dell'immagine di sinistra sono stati assunti quali valori di riferimento, mentre quelli dell'immagine di destra come dato in input da correggere; tale scelta è motivata dalla possibilità di estendere i risultati ottenuti dalla classificazione precedente all'intera area in esame.

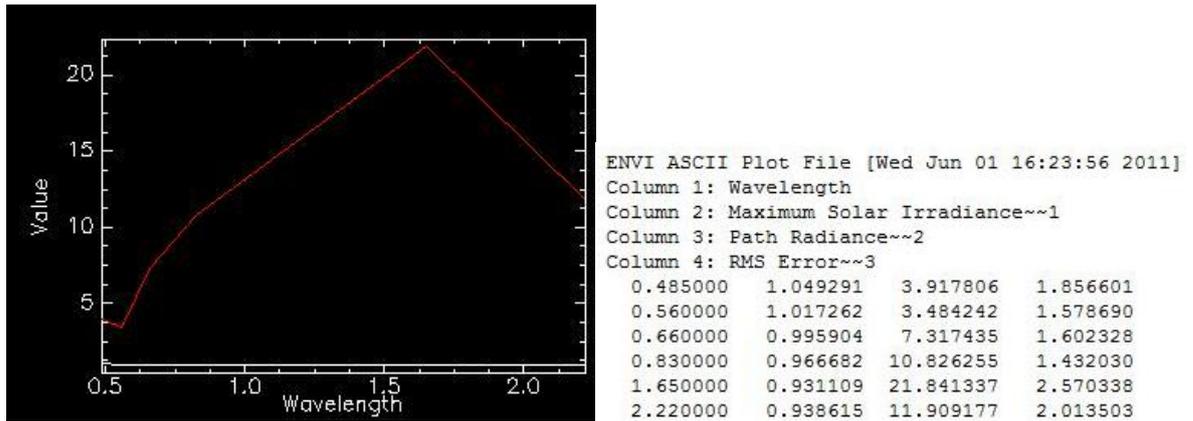


Figura 90. A sinistra grafico della linea empirica, a destra file con estensione .cff contenente i parametri per la calibrazione



Figura 91. Mosaico ottenuto attraverso la calibrazione con la linea empirica

Attraverso l'applicazione della linea di calibrazione empirica è stato quindi possibile eliminare la linea di giunzione presente fra le due strisciate, ottenendo un mosaico perfettamente omogeneo.

A seguire si riportano il mosaico ottenuto dalle due strisciate tal quali e quello ricavato a seguito della calibrazione con linea empirica della strisciata di destra relativamente al dettaglio della zona di passaggio fra le due strisciate.

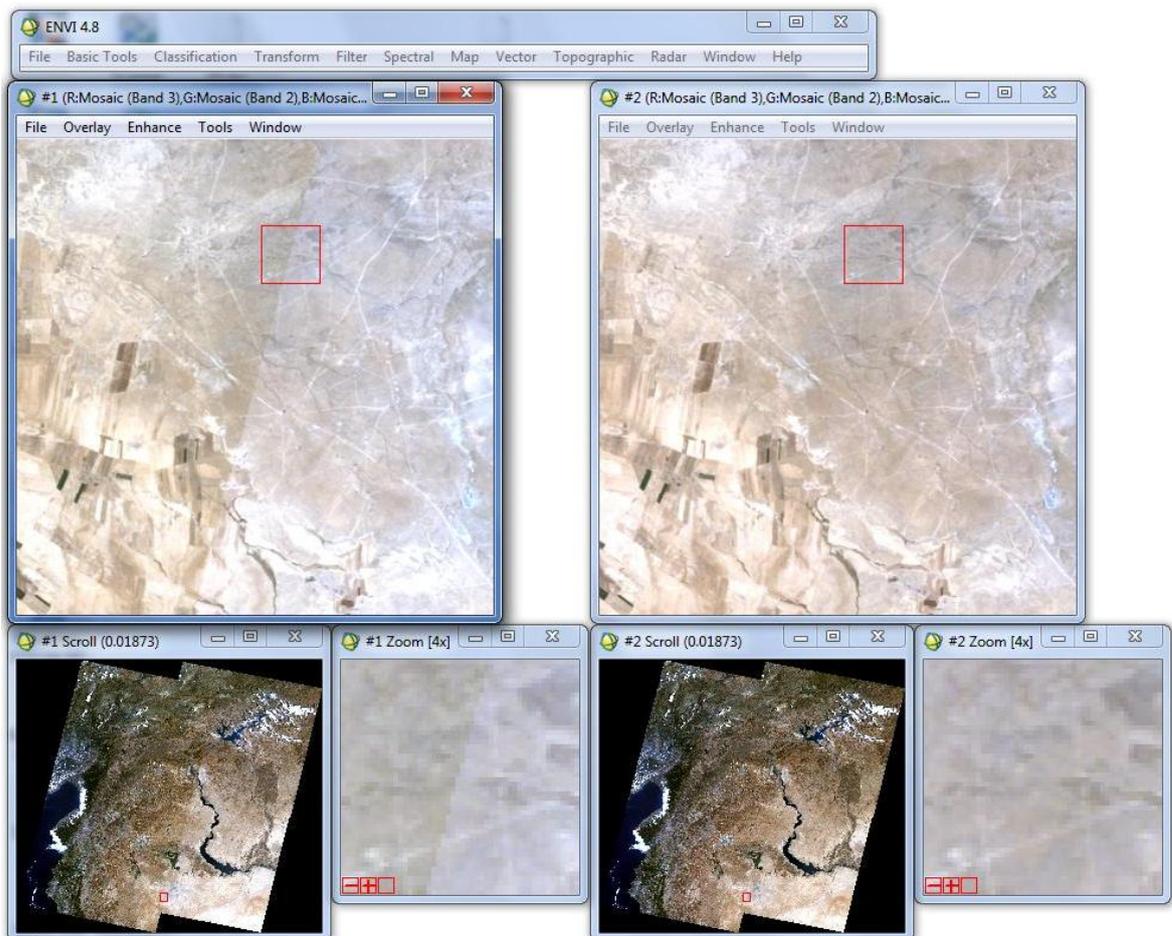


Figura 92. Confronto fra i due mosaici: a sinistra è riportato il mosaico senza alcuna manipolazione, mentre a destra quello ottenuto mediante la calibrazione con linea empirica



Figura 93. Dettaglio dell'effetto prodotto dalla calibrazione con linea empirica: in alto le due strisciate sono facilmente distinguibili, in basso sono perfettamente omogenee e pertanto non è più visibile il passaggio da una strisciata all'altra

Oltre a queste valutazioni di tipo qualitativo, è anche possibile effettuare delle analisi di tipo quantitativo per verificare il grado di correlazione esistente fra le due strisciate che compongono il mosaico. Per eseguire tale analisi di correlazione è preliminarmente necessario creare un nuovo file multibanda costituito da tutte e sei le bande per ognuna delle due strisciate, ottenendo così un file in uscita comprendente dodici bande.

Per la realizzazione di questo file si è deciso di importare per prima la strisciata di destra e poi quella di sinistra; la numerazione delle bande, risultante da tale scelta, è pertanto la seguente:

- le bande dalla 1 alla 6 corrispondono alle bande dalla 1 alla 6 della strisciata di destra
- le bande dalla 7 alla 12 corrispondono alle bande dalla 1 alla 6 della strisciata di sinistra.

Selezionando opportunamente tre bande spettrali fra le dodici a disposizione si riesce a mettere in risalto l'area di sovrapposizione delle due strisciate ed è poi possibile creare una nuova immagine comprendente la sola zona di sovrapposizione, anch'essa composta da dodici bande ordinate come sopra spiegato.

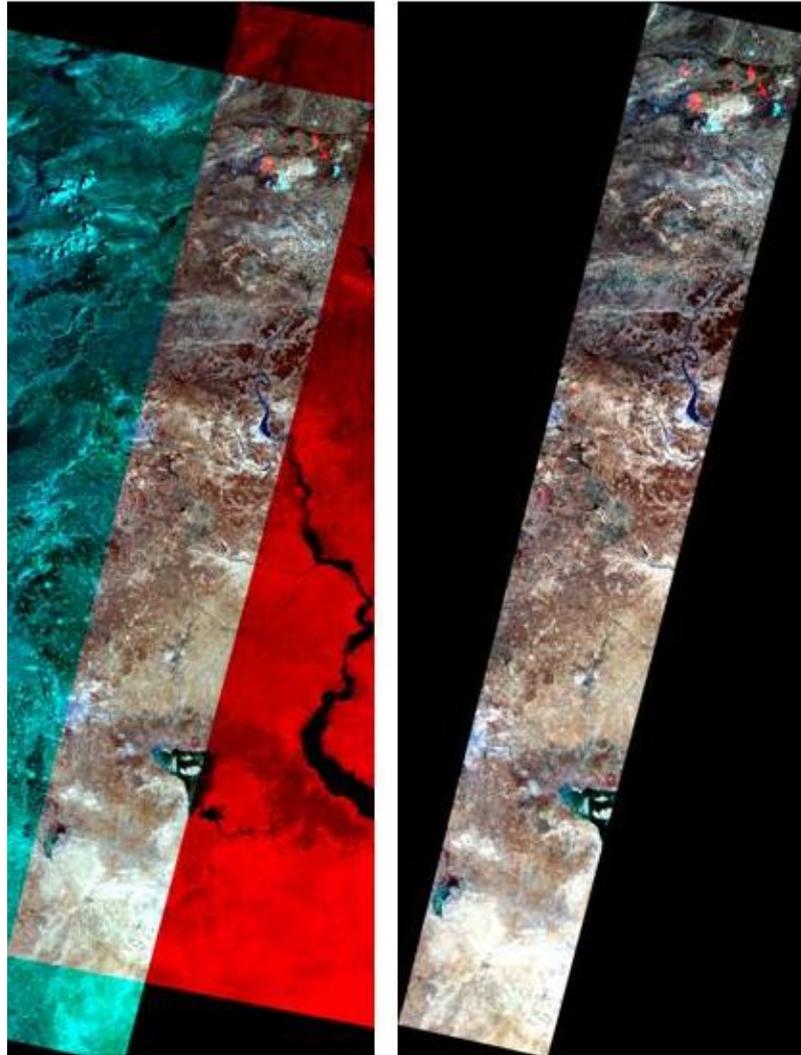


Figura 94. A sinistra, visualizzazione del file multibanda dal quale risulta evidenziata la zona di sovrapposizione del mosaico; a destra, è rappresentata la sola area di sovrapposizione

Richiedendo al software di eseguire il calcolo delle statistiche per l'immagine comprendente la sola area di sovrapposizione, è particolarmente interessante valutare la correlazione fra le bande omologhe, ossia analizzare il comportamento della medesima banda spettrale nelle due strisciate.

Correlation	Band											
Band 1	1.000	0.994	0.984	0.985	0.975	0.968	0.990	0.985	0.977	0.979	0.975	0.971
Band 2	0.994	1.000	0.994	0.987	0.980	0.978	0.980	0.982	0.979	0.975	0.975	0.974
Band 3	0.984	0.994	1.000	0.986	0.986	0.986	0.972	0.981	0.987	0.975	0.980	0.982
Band 4	0.985	0.987	0.986	1.000	0.988	0.977	0.976	0.977	0.977	0.990	0.984	0.976
Band 5	0.975	0.980	0.986	0.988	1.000	0.994	0.968	0.973	0.978	0.979	0.991	0.989
Band 6	0.968	0.978	0.986	0.977	0.994	1.000	0.957	0.965	0.972	0.964	0.981	0.989
Band 7	0.990	0.980	0.972	0.976	0.968	0.957	1.000	0.996	0.986	0.987	0.981	0.976
Band 8	0.985	0.982	0.981	0.977	0.973	0.965	0.996	1.000	0.995	0.989	0.986	0.984
Band 9	0.977	0.979	0.987	0.977	0.978	0.972	0.986	0.995	1.000	0.988	0.989	0.989
Band 10	0.979	0.975	0.975	0.990	0.979	0.964	0.987	0.989	0.988	1.000	0.991	0.982
Band 11	0.975	0.975	0.980	0.984	0.991	0.981	0.981	0.986	0.989	0.991	1.000	0.995
Band 12	0.971	0.974	0.982	0.976	0.989	0.989	0.976	0.984	0.989	0.982	0.995	1.000

Figura 95. Report statistico contenente i valori di correlazione fra le dodici bande utilizzate

Di seguito viene riportato soltanto il valore del coefficiente di correlazione lineare relativo alle bande omologhe.

N	Combinazione bande omologhe	Coefficiente di correlazione lineare
1	Band 1 - Band 7	0,990
2	Band 2 - Band 8	0,982
3	Band 3 - Band 9	0,987
4	Band 4 - Band 10	0,990
5	Band 5 - Band 11	0,991
6	Band 6 - Band 12	0,989

Tabella 9. Valore assunto dal coefficiente di correlazione lineare nelle sole bande omologhe per l'area di sovrapposizione del mosaico

Si ricorda che, date due variabili statistiche x e y, il coefficiente di correlazione lineare ρ_{xy} è calcolato mediante la seguente relazione:

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

σ_x = deviazione standard relativa alla variabile x

σ_y = deviazione standard relativa alla variabile y

σ_{xy} = covarianza tra le due variabili

Il coefficiente di correlazione lineare è variabile nell'intervallo $-1 \div 1$, a seconda dell'esistenza e della tipologia di correlazione che intercorre fra le due variabili.

Nel caso in esame, in particolare, è presente una correlazione di tipo diretto e molto forte, avendo ottenuto come valore medio del coefficiente di correlazione il valore: $\rho_{medio} = 0,988$.

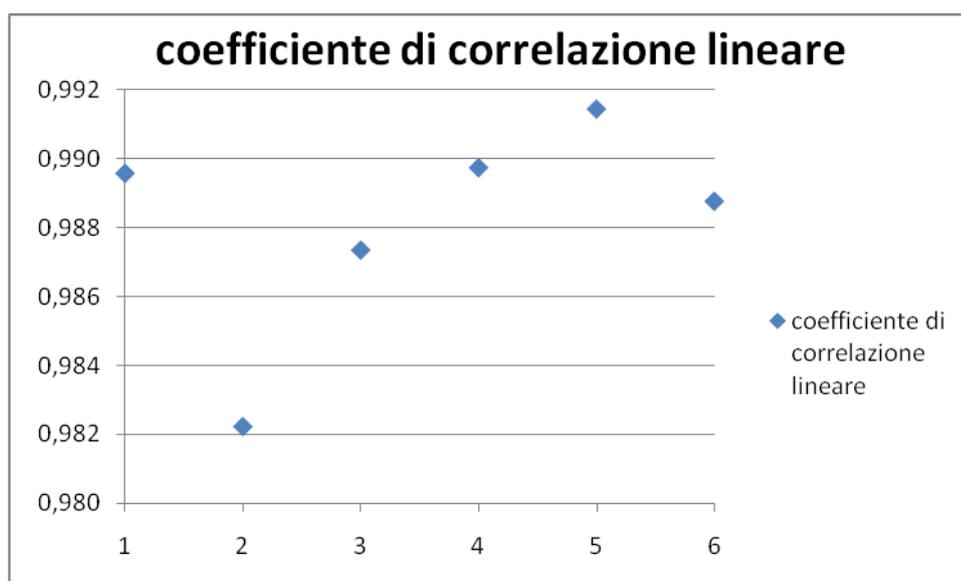


Grafico 1. Valore assunto dal coefficiente di correlazione lineare in corrispondenza delle bande omologhe nell'area di sovrapposizione del mosaico

Avendo assunto l'esistenza di una correlazione di tipo lineare fra le due strisciate, è anche possibile calcolare il coefficiente di determinazione, più comunemente noto come coefficiente R^2 , che nell'ipotesi di regressione lineare è espresso semplicemente dal quadrato del coefficiente di correlazione lineare.

N	Combinazione bande omologhe	Coefficiente R^2
1	Band 1 - Band 7	0,979
2	Band 2 - Band 8	0,965
3	Band 3 - Band 9	0,975
4	Band 4 - Band 10	0,980
5	Band 5 - Band 11	0,983
6	Band 6 - Band 12	0,978

Tabella 10. Valore assunto dal coefficiente di correlazione R^2 nelle sole bande omologhe per l'area di sovrapposizione del mosaico

Il coefficiente R^2 assume valori compresi fra 0 ed 1 a seconda della qualità della regressione lineare. Nel caso di studio si è ottenuto come valore medio del coefficiente R^2 il valore: $R^2_{\text{medio}} = 0,977$.

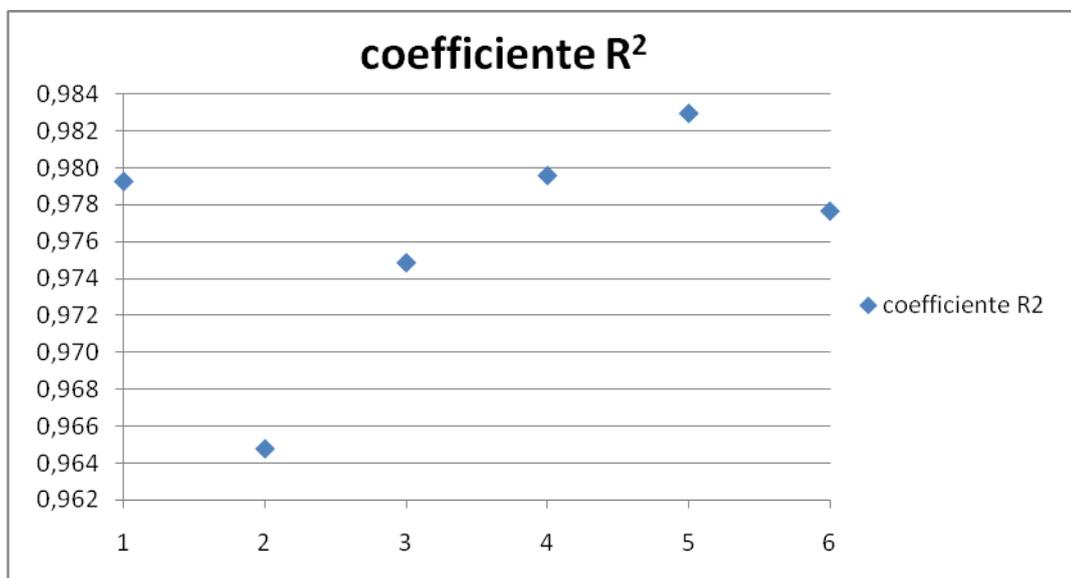


Grafico 2. Valore assunto dal coefficiente di correlazione R^2 in corrispondenza delle bande omologhe nell'area di sovrapposizione del mosaico

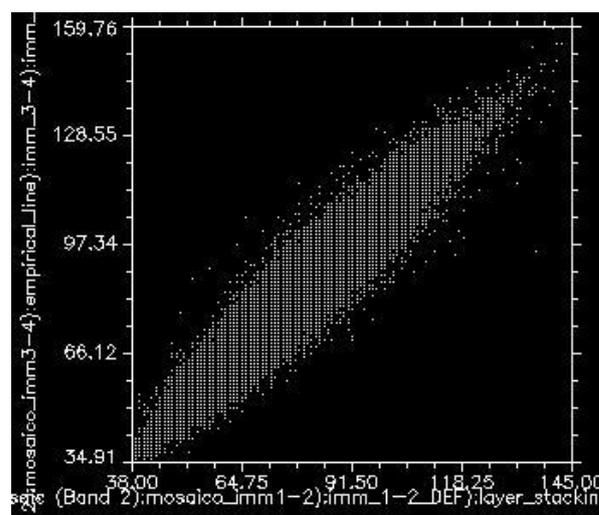
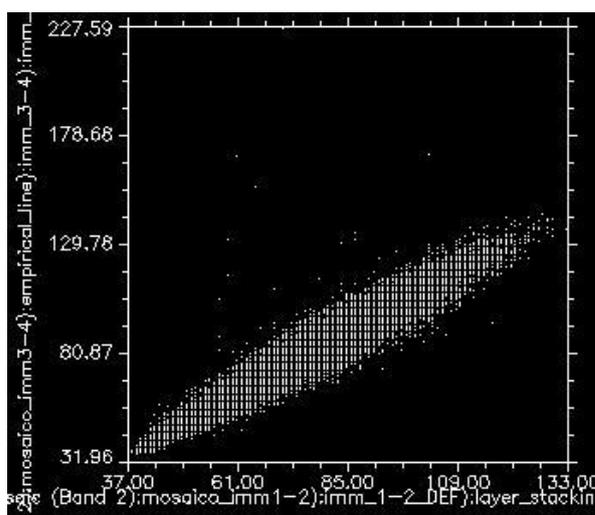
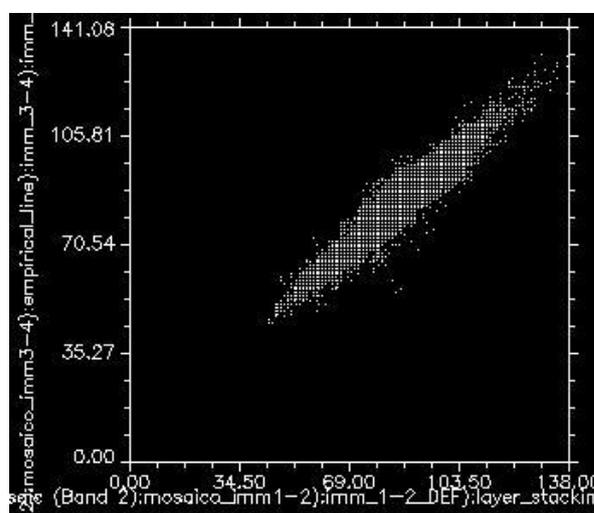
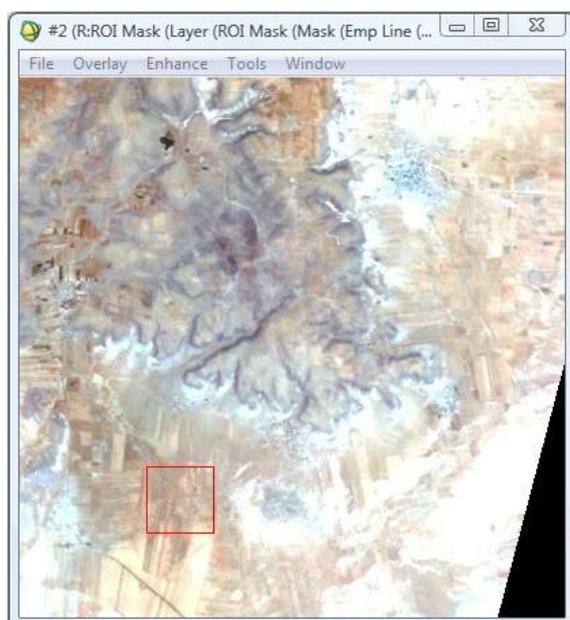
Sulla base dei risultati ottenuti si è quindi deciso di studiare in maniera più dettagliata la componente 2, ossia quella corrispondente alla combinazione fra le bande spettrali del verde ($\lambda = 0.5650 \mu\text{m}$) delle due strisciate, poiché presenta il valore minimo del coefficiente di correlazione ρ_{xy} , pari a $\rho_{27} = 0,982$. Per eseguire l'analisi di correlazione fra due bande si utilizzano i grafici di dispersione bidimensionali, noti anche come scatterogrammi o 2D scatter plot. Lo scatterogramma a due dimensioni è uno strumento avente la finalità di confrontare i valori che i pixel corrispondenti ad un'area assumono in due bande diverse, rappresentate in ordinata ed in ascissa: permettono quindi di confrontare i valori assunti dai DN nelle due bande spettrali selezionate, valutando così la dispersione spaziale dell'immagine.

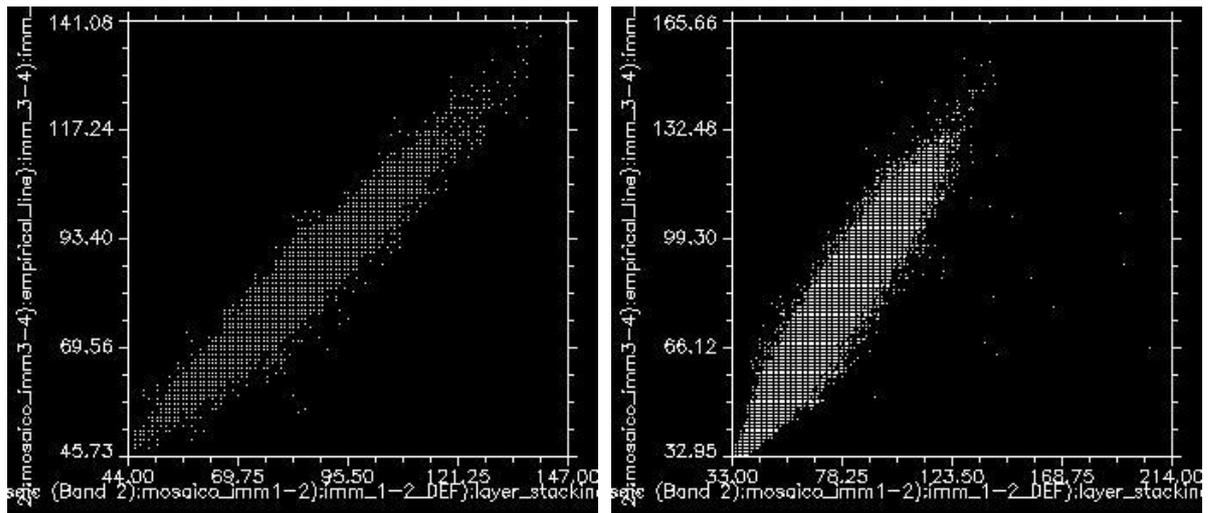
Il risultato che si ottiene è costituito da una nuvola di punti, o cluster, che consente di studiare la dispersione delle due variabili rappresentate ed il loro grado di correlazione, ossia di dipendenza lineare: un grafico di dispersione può infatti suggerire vari tipi di correlazione e la forma dei cluster è indicatrice della relazione funzionale esistente fra le due variabili.

I diagrammi a dispersione consentono quindi di visualizzare graficamente il grado e la tipologia di correlazione esistente fra due grandezze collegate fra di loro. Un grafico a dispersione risulta molto utile per visualizzare graficamente la corrispondenza fra due set di dati comparabili: più i data set corrispondono, più i punti tendono a concentrarsi esattamente sulla linea di identità.

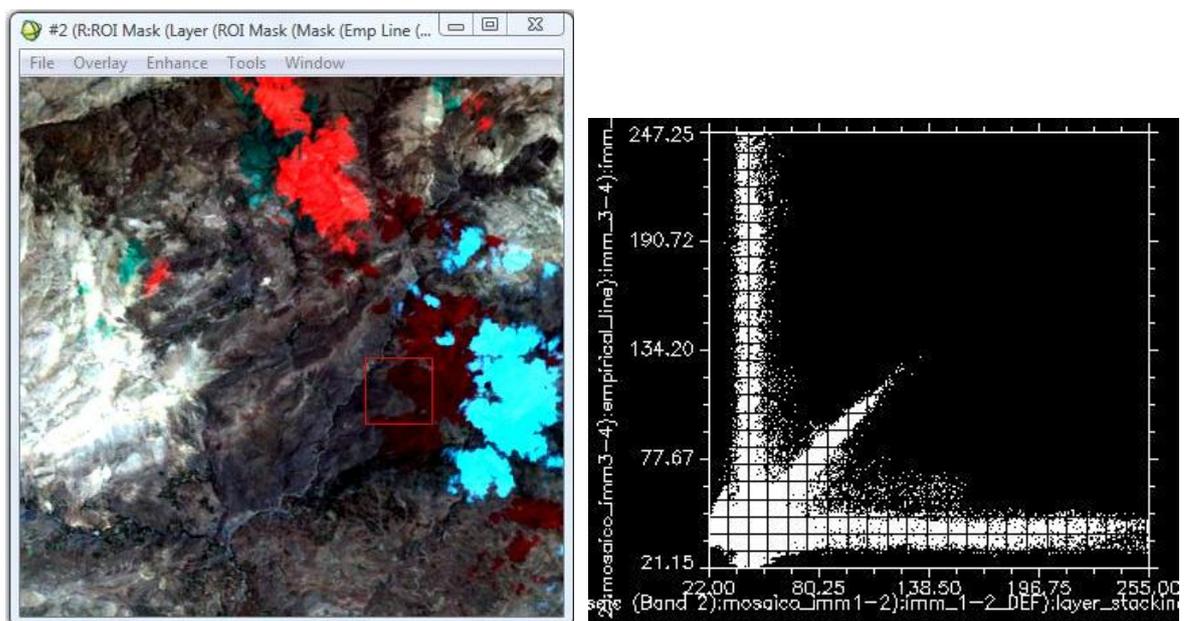
E' quindi possibile studiare l'andamento degli scatter plot verificando la similitudine di comportamento fra le due immagini.

Spostandosi lungo l'intera immagine si ottengono scatter plot differenti, che mostrano l'effettiva correlazione in varie porzioni dell'immagine. Di seguito sono riportati alcuni dei diagrammi di dispersione ottenuti, dai quali è possibile apprezzare l'elevata correlazione dell'immagine, dato che il cluster è abbastanza concentrato e mostra un andamento lineare.





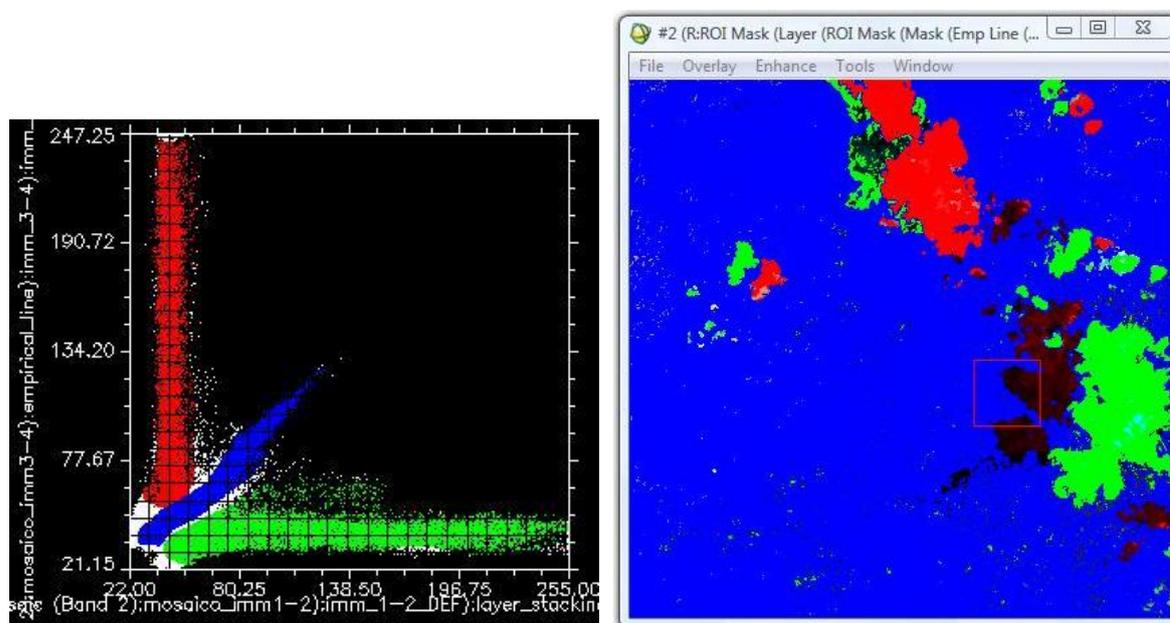
Spostandosi nelle zone dell'immagine ove sono presenti una o più coperture nuvolose è anche possibile mettere in evidenza il tipico effetto prodotto dalle nubi riscontrabile sia nella forma che nella dispersione dello scatterogramma, come nel diagramma a dispersione di seguito riportato.



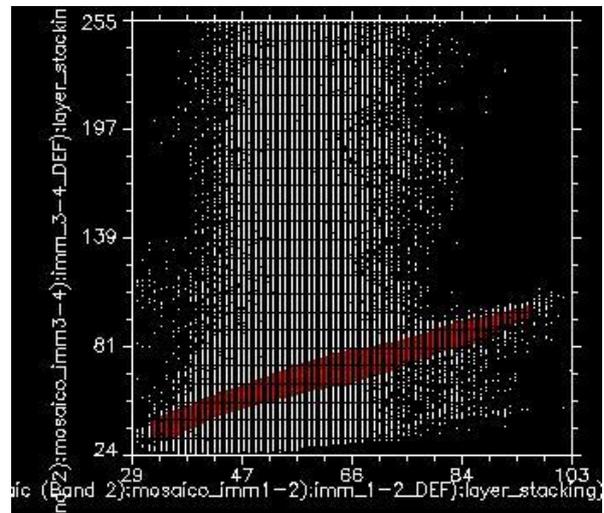
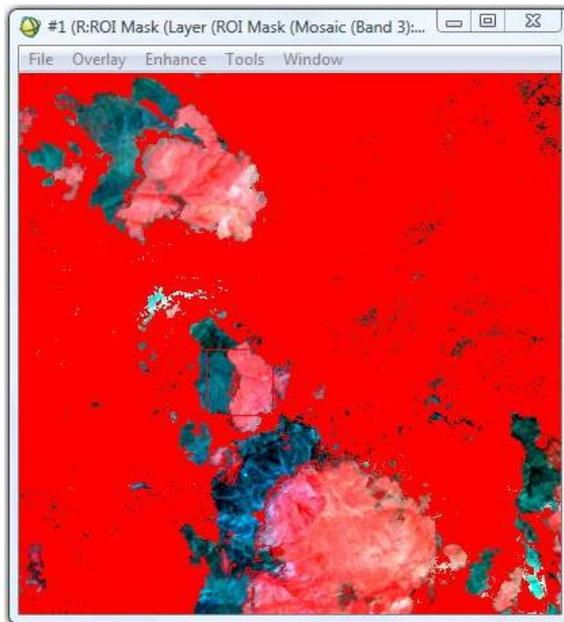
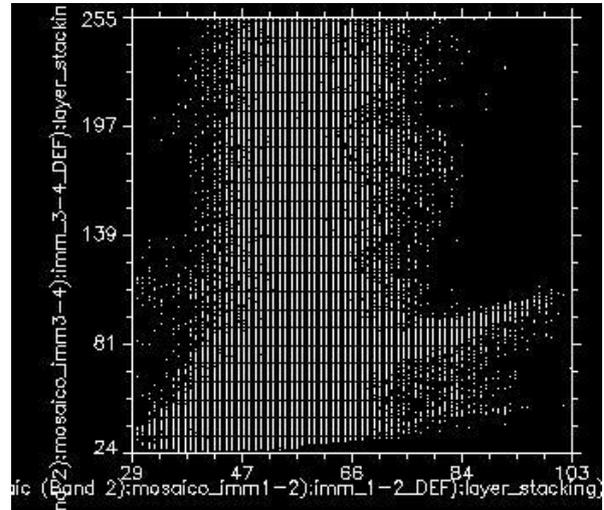
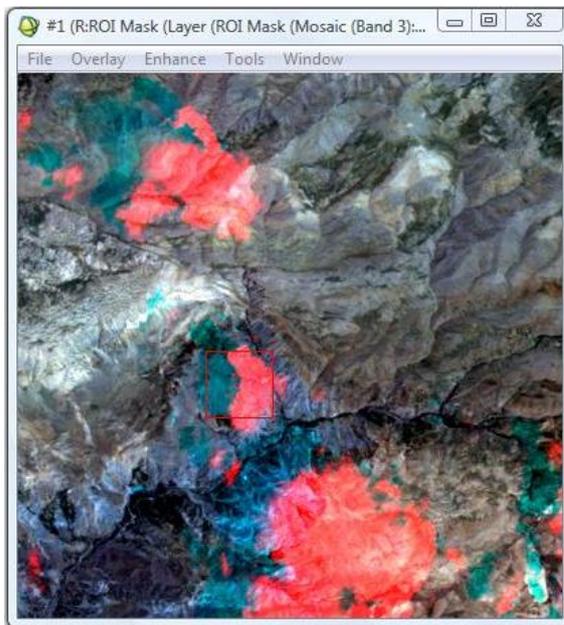
La nuvola di punti che costituisce lo scatterogramma, infatti, presenta una forma particolare dalla quale sono facilmente riconoscibili tre grandi famiglie di punti:

- a. la copertura nuvolosa e la relativa ombra da essa generata presente nella strisciata di sinistra
- b. la copertura nuvolosa e la relativa ombra da essa generata presente nella strisciata di destra
- c. la restante parte della zona di sovrapposizione

Assegnando un colore differente di visualizzazione per ciascuna delle tre famiglie sopra delineate è possibile verificare la loro distribuzione spaziale nell'immagine. Quello che si evince è che le nubi presentano un andamento fra loro perpendicolare, mentre la parte dell'immagine sgombra dalla copertura nuvolosa evidenzia molto bene il comportamento lineare.



Qualora si abbia la presenza di copertura nuvolosa solo in una delle due strisciate si ottiene un andamento completamente differente. In questo caso, infatti, si ha una fortissima dispersione dei punti appartenenti alla strisciata ove è presente copertura nuvolosa (nel caso in esame la strisciata di destra), ma è comunque possibile apprezzare come la restante parte dell'immagine, libera dalla copertura nuvolosa, risulti fortemente correlata.



7.7 Classificazione del mosaico

Una volta calibrato il mosaico attraverso l'utilizzo della linea empirica, sulla base della classificazione precedentemente eseguita, si è passati alla classificazione del mosaico stesso, utilizzando le medesime classi tematiche precedentemente riportate. Di seguito viene riportata la mappa tematica generata ed un dettaglio della sovrapposizione ottenibile dal confronto con il software Google Earth.

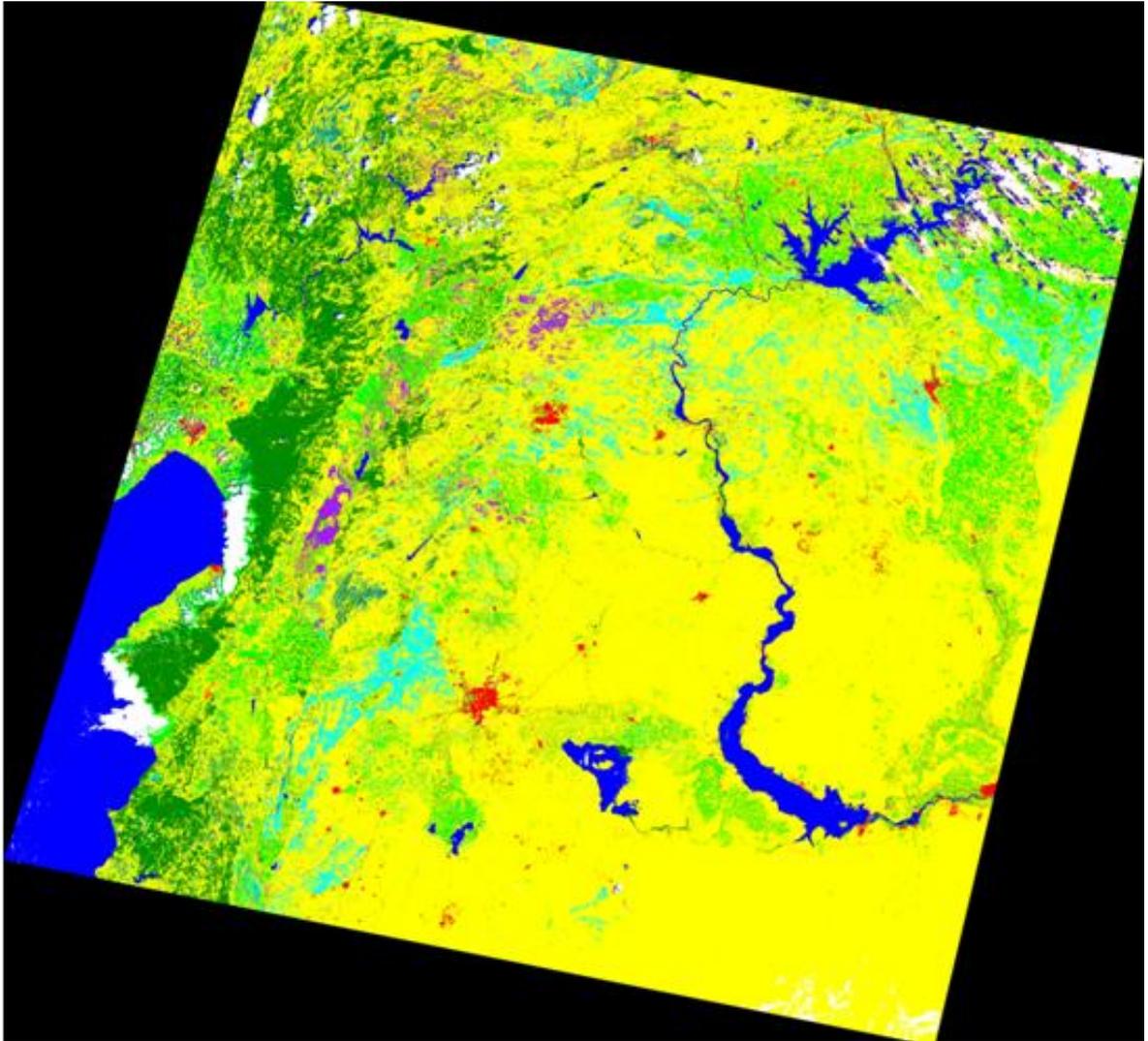


Figura 96. Classificazione dell'intera area mosaicata

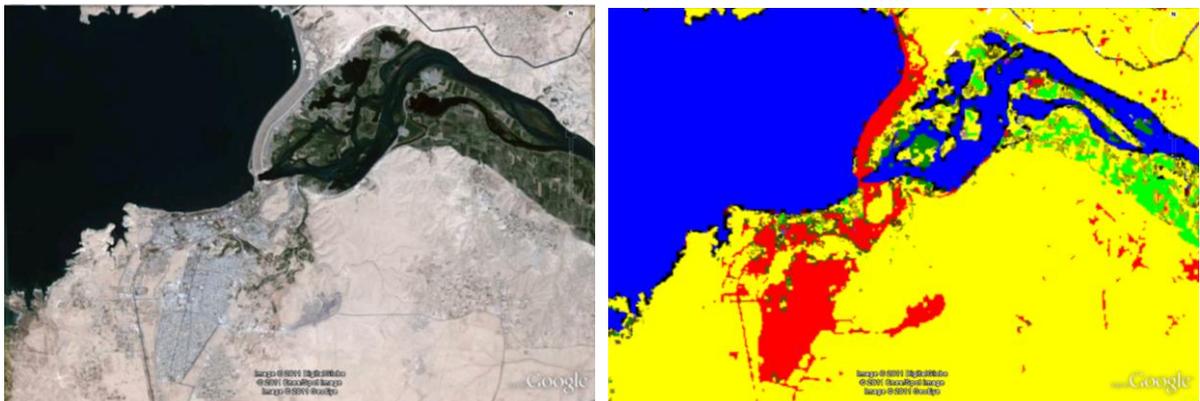


Figura 97. Dettaglio della classificazione del mosaico: è rappresentata la città di Ath Thawrah

7.8 Caratterizzazione sismologica dell'area

A completamento delle elaborazioni di inquadramento del territorio della Siria interna settentrionale, considerando l'elevata sismicità della regione, è stato anche realizzato un layer relativo alla sismicità dell'area, con la visualizzazione in ambiente GIS dei principali sistemi di faglia presenti. I dati, ricavati in letteratura, sono già stati descritti nel Capitolo 6 (si fa riferimento in particolare alla figura 16).

Il fine di questa parte del lavoro, oltre ad ampliare la caratterizzazione dell'area, è quello di poter anche valutare le eventuali relazioni tra la posizione dei siti archeologici e le zone a maggiore sismicità.

Per questa attività, dopo aver eseguito la georeferenziazione della cartografia presentata nella pubblicazione, attraverso una specifica funzione del software ENVI si sono vettorializzati manualmente i principali sistemi di faglia, creando così dei layer da poter sovrapporre alle differenti immagini a disposizione.

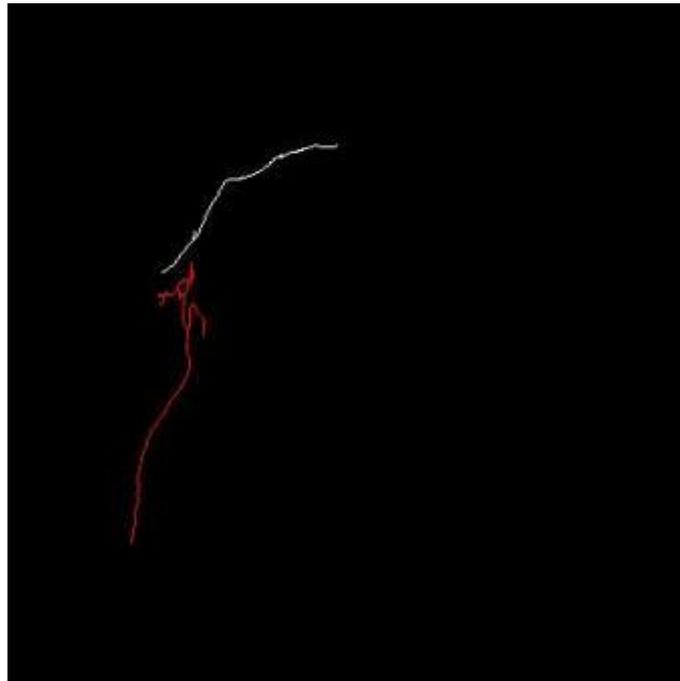


Figura 98. Visualizzazione del layer rappresentante i principali sistemi di faglia; in rosso il sistema di faglia del Mar Morto, in bianco la faglia Est anatolica

Va ricordato ancora che i lavori che è stato possibile recuperare sono a scala molto piccola, con rappresentazioni spesso di bassa qualità cartografia, e dunque questi dati vanno considerati a titolo puramente indicativo; la distribuzione e localizzazione dei sistemi di faglia non deve essere pertanto assunta come certa ed assoluta.

Di seguito si riportano alcuni esempi di sovrapposizione con immagini satellitari o prodotti da esse derivati.



Figura 99. Rappresentazione, sull'immagine Landsat 7 ETM+, dei principali sistemi di faglia presenti nella regione delle Siria interna settentrionale: in rosso è mostrato il sistema di faglia del Mar Morto, in bianco la faglia Est anatolica

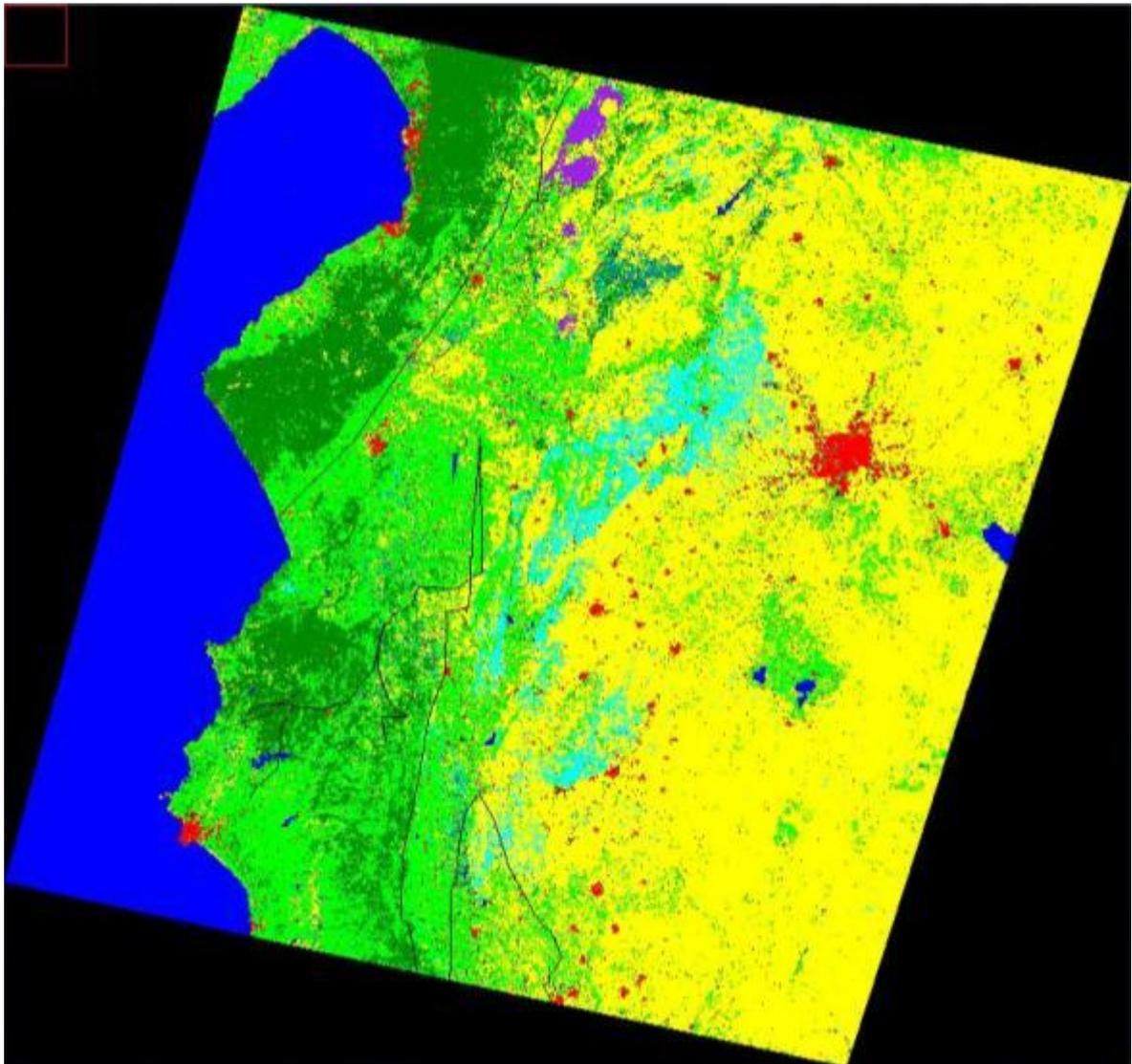


Figura 100. Rappresentazione dei principali sistemi di faglia nella mappa tematica ottenuta dalla classificazione dell'immagine Landsat 7 ETM+

Dalle due immagini sopra riportate è possibile notare come il sistema di faglia del Mar Morto sia principalmente costituito dalla zona di depressione formata dalla valle del Ghab, mentre la faglia Est Anatolica presenti un andamento all'incirca parallelo rispetto alle catene montuose che si affacciano sulla costa.

Nell'immagine a seguire è mostrata la distribuzione dei sistemi di faglia rispetto al posizionamento dei siti d'interesse.

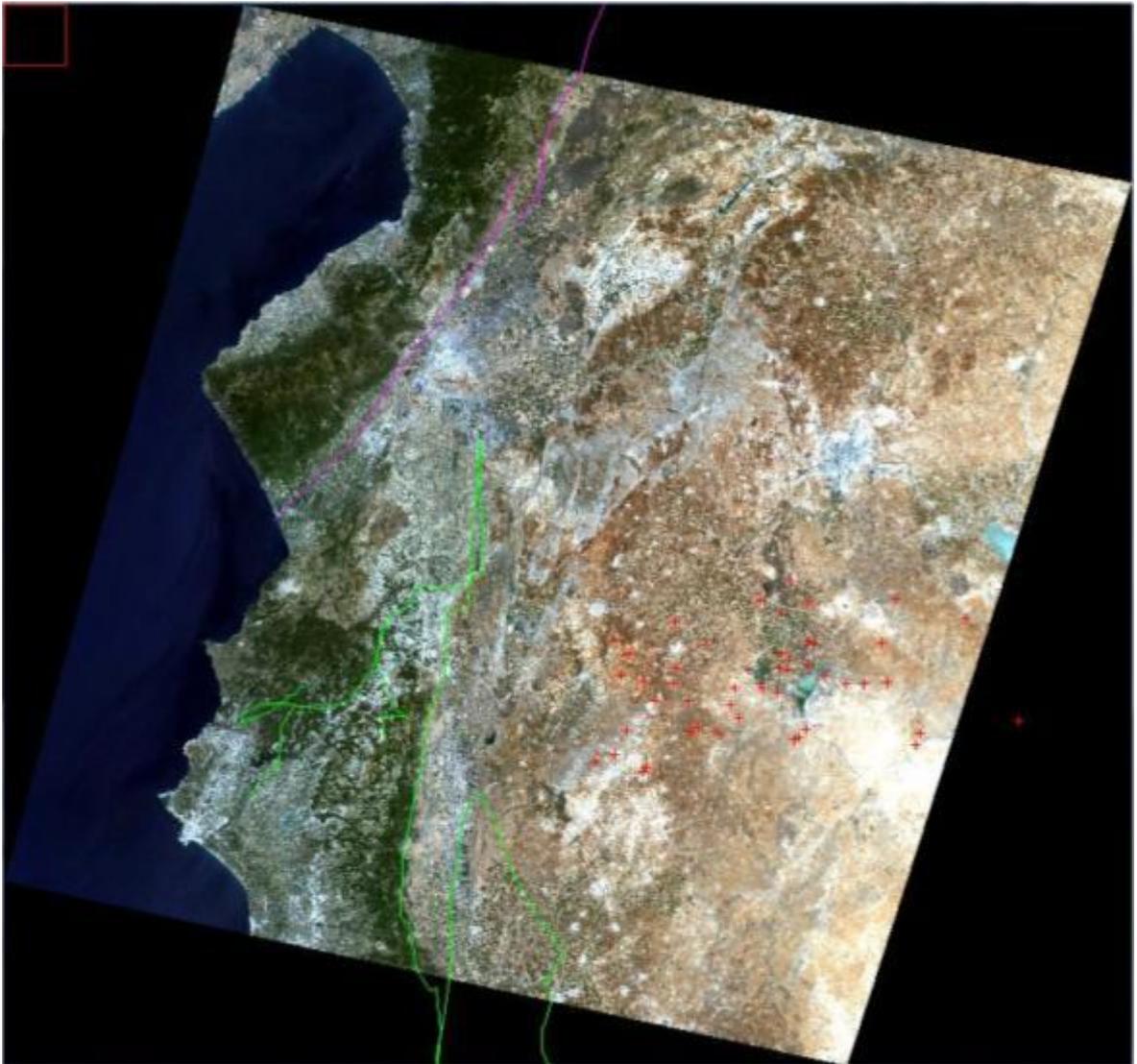


Figura 101. Posizionamento dei principali siti archeologici, in rosso, rispetto ai maggiori sistemi di faglia

E' possibile notare come le aree di interesse si trovino in una zona apparentemente non attraversata da sistemi di faglia rilevanti.

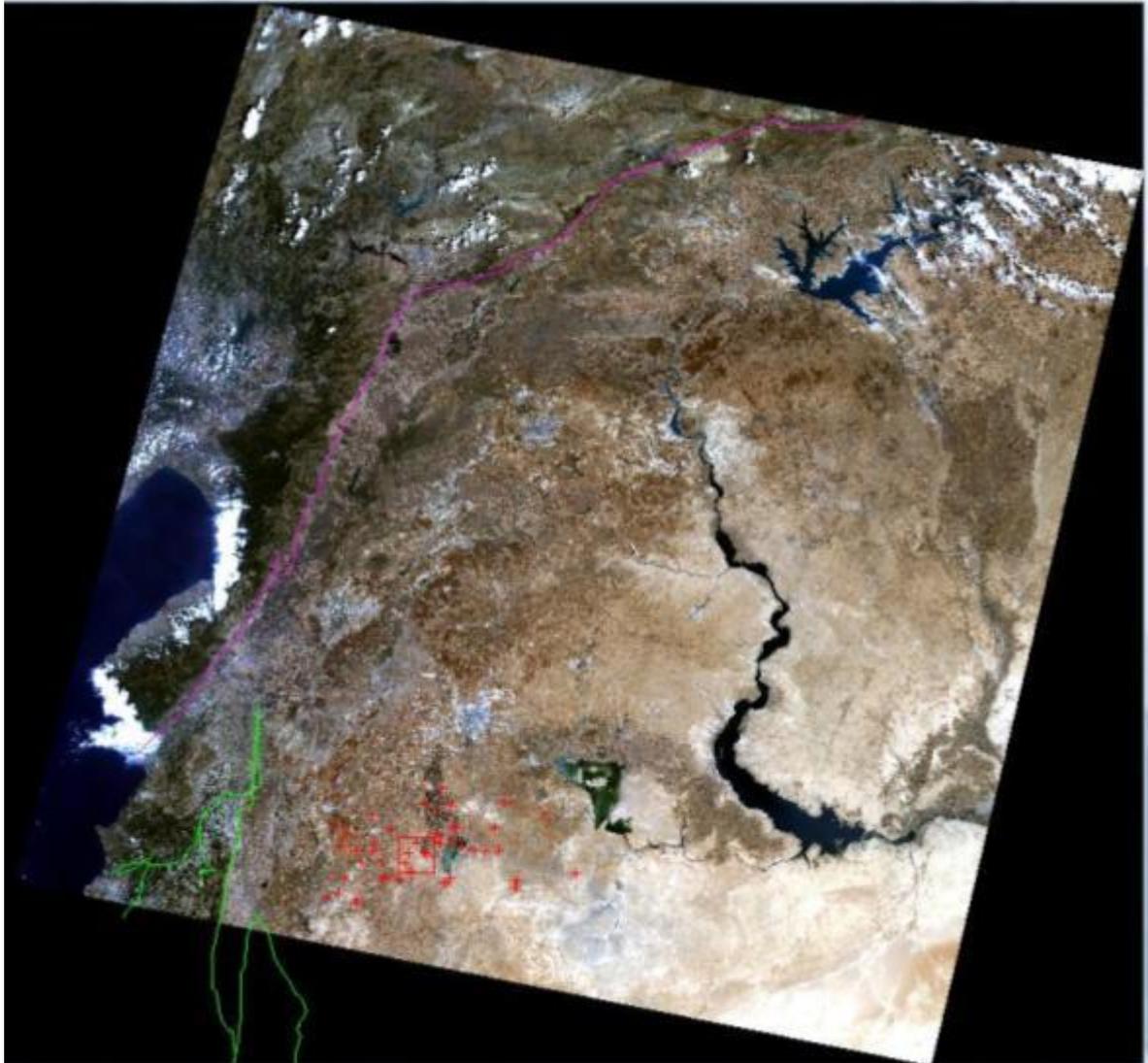


Figura 102. Posizionamento dei principali siti archeologici, in rosso, rispetto ai maggiori sistemi di faglia presenti nella regione analizzata a seguito della costruzione del mosaico

Infine, attraverso un'apposita funzione del software ENVI, si è creata una vista tridimensionale del mosaico, con la sovrapposizione dei sistemi di faglia e dei siti archeologici d'interesse, utilizzando il DSM SRTM come riferimento per le quote; si tratta di un tipo di rappresentazione molto espressiva, che consente di apprezzare meglio la morfologia e le relazioni spaziali tra le entità gestite.

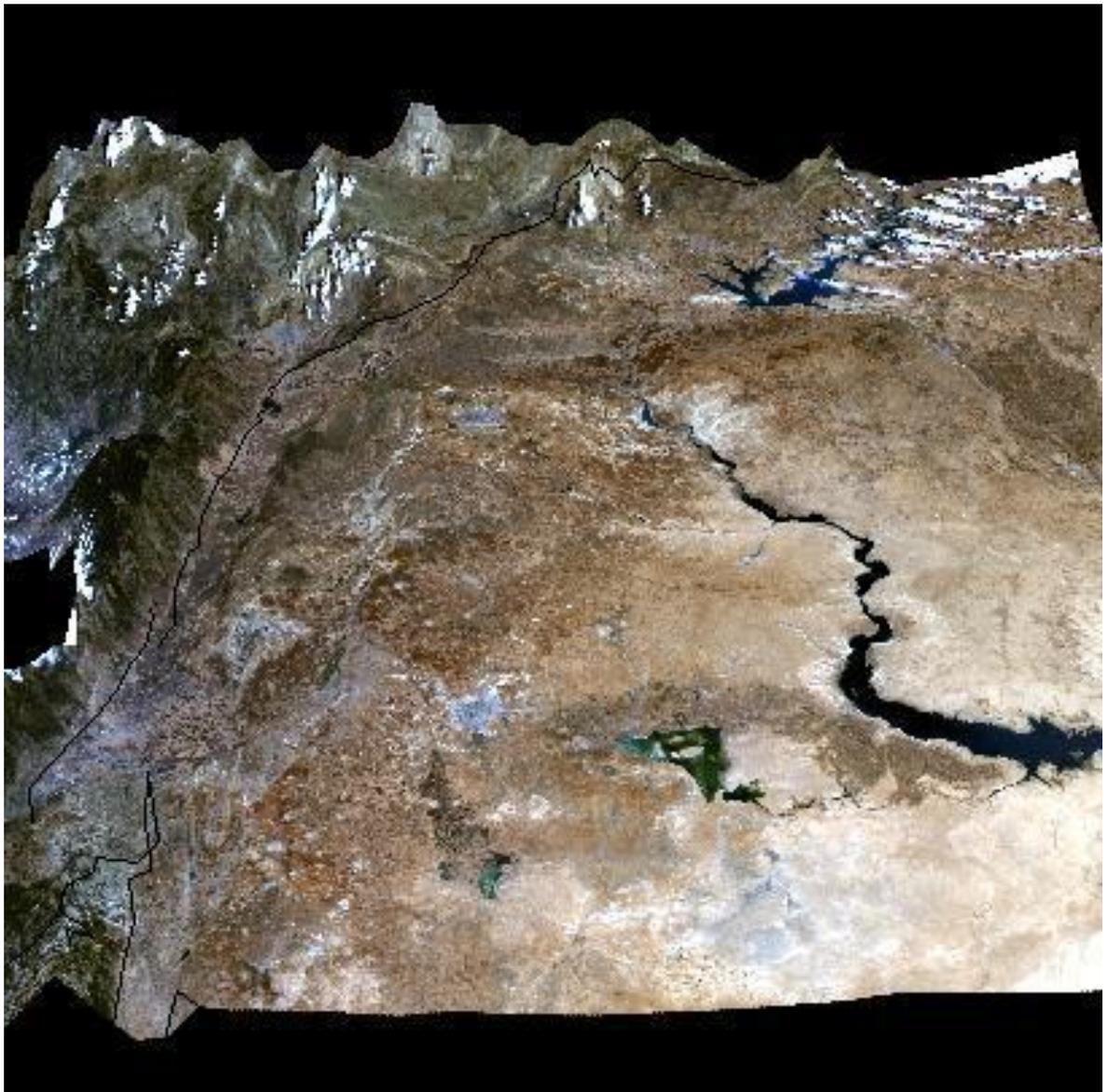


Figura 103. Vista 3D della superficie con esagerazione verticale 23x; le faglie sono riportate in nero

8. Conclusioni

A conclusione del presente elaborato di tesi si può affermare che è stata ottenuta una classificazione della regione della Siria interna settentrionale che ben rappresenta la realtà del territorio analizzato.

Stante l'assenza di dati a terra da poter utilizzare come riferimento per la classificazione (probabilmente non acquisibili a breve per la situazione socio – politica in cui si trova la regione, che non rende possibile l'esecuzione di nuove missioni), si è scelto di estrapolare soltanto un limitato numero di classi tematiche, realizzando quindi una classificazione non eccessivamente dettagliata e cercando di individuare e distinguere le principali tipologie di copertura presenti.

Inoltre, non disponendo di dati a terra attraverso i quali poter effettuare una validazione rigorosa dei risultati ottenuti, si è fatto riferimento soprattutto a valutazioni condotte mediante fotointerpretazione, dalle quali emerge l'elevata corrispondenza fra la mappa tematica prodotta ed il territorio preso in esame.

Il confronto multitemporale fra due mappe tematiche rappresentanti la regione della Siria interna settentrionale in due epoche differenti ha permesso di evidenziare le principali trasformazioni del territorio analizzato nel corso degli ultimi venti anni, a partire dalla fine degli anni Ottanta fino ad oggi. Tali modificazioni, in particolar modo rappresentate da consistenti processi di urbanizzazione, risultano compatibili con le informazioni a disposizione.

E' stata poi condotta un'analisi su una scala di maggiore dettaglio classificando un'immagine del sensore ASTER, che ha parzialmente confermato i risultati ottenuti attraverso la classificazione dell'immagine Landsat usata in precedenza. Il disaccordo è determinato dalla diversa distribuzione e concentrazione delle aree coltivate, ma tale discordanza può essere spiegata dalla differenza temporale che intercorre fra le due acquisizioni.

Per permettere una migliore caratterizzazione della regione in esame, si è successivamente ampliata l'area considerata attraverso l'esecuzione di un mosaico georeferenziato, che è stato ottenuto unendo quattro immagini satellitari Landsat acquisite dal sensore TM nel giugno del 2009.

Tale elaborazione, oltre a consentire di operare su un'area molto più vasta rispetto alla precedente, ha anche permesso di valutare le differenti problematiche nell'esecuzione delle procedure di mosaicatura. I risultati ottenuti, in particolare, mostrano come l'utilizzo delle funzioni standard dedicate a tale applicazione non abbiano permesso di risolvere la questione relativa all'eliminazione della linea di giunzione fra le due strisciate che compongono il mosaico, producendo risultati qualitativamente peggiori rispetto a quelli derivanti dalla semplice mosaicatura.

Per poter comporre nella maniera migliore possibile il mosaico, si è quindi effettuata la calibrazione mediante la cosiddetta tecnica della “linea empirica”, al fine di uniformare la risposta radiometrica delle due strisciate che coprono l’area oggetto di studio. Attraverso tale elaborazione è stato possibile realizzare un mosaico di ottima qualità, così come si è potuto constatare dalle valutazioni qualitative e soprattutto dalle analisi quantitative successivamente effettuate. Una volta eseguita la calibrazione, si è provveduto a classificare l’intera area mosaicata, producendo una mappa tematica relativa ad un territorio molto più vasto rispetto a quello inizialmente preso in considerazione.

Considerando l’elevata sismicità della regione, è opportuno avere conoscenza della distribuzione delle faglie e degli epicentri di terremoti del passato rispetto alle aree di interesse; l’informazione può essere utile anche per valutare la possibilità che gli eventi distruttivi che hanno determinato la scomparsa di siti o la loro decadenza possano essere legati ad eventi sismici. A questo fine si sono vettorializzati i principali sistemi di faglia presenti, in maniera da poterli visualizzare nelle diverse immagini a disposizione sia in modalità 2D che in 3D.

Le analisi condotte, pur non potendosi considerare esaustive, hanno messo in evidenza le potenzialità del Telerilevamento nel supporto alle indagini multidisciplinari che interessano la ricerca sullo sviluppo e sulle trasformazioni del territorio.

Il lavoro svolto ed i relativi risultati ottenuti costituiscono un primo supporto per le differenti attività e ricerche che insistono nella regione e possono essere sicuramente considerati una buona base di partenza per sviluppi ed integrazioni successive. Attraverso l’esecuzione di una missione nella regione sarà possibile acquisire una serie di informazioni, mediante le quali valutare quantitativamente i differenti risultati ottenuti, migliorandoli sulla base dei dati di verità a terra.

L’attività di ricerca potrà quindi trovare una futura prosecuzione nell’approfondimento di alcune tematiche emerse a seguito dello svolgimento del presente lavoro, le quali richiedono, tuttavia, dati di validazione a terra, ad oggi non disponibili, e l’impiego di ulteriori dati multispettrali a maggiore risoluzione che saranno acquisiti in un prossimo futuro.

9. Bibliografia

Altobelli A, Napolitano R, Bressan E, et al: “Analisi dell'informazione spettrale della vegetazione tramite l'impiego di indici ottenuti da immagini satellitari Landsat”. Atti del XIII Congresso Nazionale della Società Italiana di Ecologia, Como, 8 – 10 settembre 2003.

Ambraseys N, Barazangi M: “The 1759 earthquake in the Bekaa Valley: Implications for earthquake hazard assessment in the Mediterranean region”. Journal of Geophysical Research, 1994.

Ambraseys N: “The 12th century seismic paroxysm in the Middle East: a historical perspective”. Annals of Geophysics, vol. 47, N. 2/3, April/June 2004.

Brivio P.A, Lechi G, Zilioli E, “Principi e metodi di Telerilevamento”, 2006.

Dainelli L: “L'osservazione della Terra – Telerilevamento. Manuale teorico – pratico per l'elaborazione delle immagini digitali”, 2011.

Dalati M: “The role of remote sensing in detecting active and fresh faulting zones. Case study: northwest of Syria, Al – Ghab graben complex”.

Dalati M: “Lineaments on Landsat images – detection mapping and tectonic significance in north – western depression of Syria”. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B7, Amsterdam 2000.

Doglionni C: “Tettonica delle placche”.

Emre O, Duman TY: “The East Anatolian Fault: Structural pattern and relationship with the Dead Sea Transform”. American Geophysical Union, Fall Meeting 2007.

Harris T: “Ground Truth for Calibrating Optical Imagery to Reflectance. The Empirical Line Calibration in ENVI. ”

Jassim S.Z, Goff J.C: “Geology of Iraq”, 2006.

Karpouzli E, Malthus T: “The empirical line method for the atmospheric correction of IKONOS imagery”. International Journal of Remote Sensing , Vol. 24, N. 5, 1143 – 1150, 2003.

Sbeinati M.R, Darawcheh R, Mouty M: “Field archaeological evidences of seismic effects in Syria”.

Sbeinati M.R, Darawcheh R, Mouty M: “The historical earthquakes of Syria: an analysis of large and moderate earthquakes from 1365 B.C. to 1900 A.D.” Annals of Geophysics, Vol. 48, N. 3, June 2005.

Serpico S.B: “Classificazione Statistica di Immagini Telerilevate del Territorio: Inquadramento e Sviluppi Recenti“

Tarantino C, Pasquariello G, Blonda P, “Confronto tra metodologie pixel – based vs. object – oriented per la classificazione di dati telerilevati ad alta risoluzione”. Atti 13° Conferenza Nazionale ASITA, Bari, 1 – 4 dicembre 2009.

Westaway R: “Kinematic consistency between the Dead Sea Fault Zone and the Neogene and Quaternary left-lateral faulting in SE Turkey”, 2004.

Yilmaz H, Over S, Ozden, S: “Kinematics of the East Anatolian Fault Zone between Turkoglu (Kahramanmaras) and Celikhan (Adiyaman), eastern Turkey”, 2006.

10. Ringraziamenti

A conclusione del lavoro svolto si ringraziano il Prof. Gabriele Bitelli, in qualità di relatore della tesi, per l'opportunità offertami e la disponibilità sempre dimostrata e l'Ing. Emanuele Mandanici, quale correlatore della tesi, per l'aiuto offerto e l'assistenza datami nel risolvere le varie problematiche riscontrate.

Si ringraziano il Prof. Marchetti, responsabile e coordinatore del progetto Ebla per l'Università di Bologna per aver fornito un supporto esperto nella conoscenza del territorio e l'archeologo Simone Mantellini per gli importanti dati di inquadramento della regione analizzata.

Si ringraziano i componenti della struttura di riferimento, il laboratorio di Topografia del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali, per avermi permesso di condividere i loro spazi con la massima disponibilità.

Ringrazio i miei genitori non semplicemente perché se mi trovo qui è in fondo merito loro, ma soprattutto per gli ideali ed i valori che hanno sempre cercato di insegnarmi e trasmettermi.

Ringrazio mio fratello per quella sua capacità di prendere la vita con quel giusto tocco di pazzia.

Ringrazio Claudia per essere entrata nella mia vita in punta di piedi ed averla poi stravolta, dandole un significato nuovo e per le emozioni che è capace di regalarmi.

Ringrazio Valè, Dani, Ila, Fabio, Lauretta, Gerri, Lollo, Luci, Fra, Giugiolo, Debbie e tutta l'allegria combriccola perché è più bello tornare in Ancona sapendo di trovarli.

Ringrazio gli amici della Piazza, quelli che anche se non ci si sente quasi mai e ci si vede ancora meno, sai sempre dove e come trovarli ed ogni volta che ci si rivede pare non sia passato un giorno dall'ultima volta.

Ringrazio Fabio e Lollo perché senza di loro gli anni delle superiori non sarebbero stati così divertenti e soprattutto non così alcolici.

Ringrazio quelli del TDK perché ci sono sempre, sia nelle piccole che nelle grandi occasioni.

Ringrazio Dani, Valè, Fabio e Clà per tutte le trasferte e le serate bolognesi che ci siamo fatti negli ultimi anni e per le scene mitiche che da lì sono nate.

Ringrazio Dani ed Ila perché sono sempre troppo buoni, carini e gentili con me.

Ringrazio Mauro, Daniè, Giusè, Fabio, Mongio e Claudia perché fare l'università con loro è stato molto più divertente, anche se più lento, e per tutti i ricordi indimenticabili e le risate a crepelle di questi 7 anni.

Ringrazio i The Martini's 37 per essere stati in questi anni quasi come una seconda casa.

Ringrazio gli appunti della Claudia senza i quali forse non avrei ancora finito la triennale.

Ringrazio la Marghe, alias Lady Spreafico, alias Leader Maximo, perché per far funzionare un gruppo una come lei è fondamentale ed insostituibile.

Ringrazio Lisbona e Bologna per tutte le persone che mi hanno regalato e per tutto ciò che mi hanno permesso di vivere durante questi anni, facendomi diventare (spero!!) una persona migliore rispetto a quando mi preparavo ad iniziare questa fantastica avventura.