

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

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

*DICAM - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali*

**TESI DI LAUREA**

in

Telerilevamento LS

**CLASSIFICAZIONE E DINAMICA DI SVILUPPO DI  
AREE URBANE DA IMMAGINI SATELLITARI  
PER LA GESTIONE DEL RISCHIO**

CANDIDATO

Francesca Franci

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Gabriele Bitelli

CORRELATORI:

Prof. Piero Boccardo

Dott. Ing. Daniele Saverio Torlai Triglia

Dott. Ing. Emanuele Mandanici

Anno Accademico 2010/2011

Sessione I

## **INDICE**

<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>4</b>
<b>CAPITOLO 1 - IL TELERILEVAMENTO</b> .....	<b>6</b>
1.1 ASPETTI GENERALI .....	6
1.2 LA RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA: LEGGI DELLA RADIAZIONE E INTERAZIONI CON LA MATERIA .....	7
1.3 SENSORI, PIATTAFORME E REQUISITI OPERATIVI.....	14
1.3.1 Sensori.....	14
1.3.2 Piattaforme .....	17
1.3.3 Modalità di acquisizione.....	18
1.3.4 Requisiti operativi e funzionali .....	19
1.4 MISSIONI PER LO STUDIO E IL MONITORAGGIO DEL TERRITORIO E DELL'AMBIENTE.....	22
1.4.1 Satelliti ad alta risoluzione spaziale .....	22
1.4.2 Satelliti ad alta risoluzione spettrale.....	28
1.4.3 Satelliti ad alta risoluzione temporale.....	34
1.4.4 Sensori attivi .....	36
<b>CAPITOLO 2 - APPLICAZIONI DEI DATI TELERILEVATI</b> .....	<b>39</b>
2.1 GESTIONE DEL TERRITORIO: LAND USE/COVER .....	43
2.1.1 Lande use/cover change (LULCC): rurale / urbano .....	44
2.2 GESTIONE DEL RISCHIO .....	45
<b>CAPITOLO 3 - LA CLASSIFICAZIONE DELLE IMMAGINI</b> .....	<b>46</b>
3.1 CLASSIFICAZIONE AUTOMATICA .....	47
3.1.1 Classificazione supervisionata.....	49
3.2 VALIDAZIONE.....	54
<b>CAPITOLO 4 - CASO DI STUDIO</b> .....	<b>58</b>

4.1 ITHACA.....	58
4.2 DHAKA (BANGLADESH) .....	60
4.3 MATERIALE .....	66
4.4 SOFTWARE UTILIZZATO PER L'ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI.....	68
4.5 PRE-ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI .....	69
4.6 LA CLASSIFICAZIONE DELLE IMMAGINI LANDSAT.....	70
4.6.1 Validazione .....	74
4.6.2 Considerazioni .....	77
4.7 CHANGE DETECTION: LAND USE/COVER CHANGE.....	84
4.7.1 Considerazioni .....	86
4.8 AREE INONDABILI .....	92
4.9 AGGIORNAMENTO BANCA DATI.....	98
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>101</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>104</b>
<b>SITOGRAFIA.....</b>	<b>107</b>

## INTRODUZIONE

Il telerilevamento è “una scienza che permette di ottenere informazioni qualitative e quantitative da un oggetto, un’area o un fenomeno, tramite l’analisi di dati acquisiti da un dispositivo a distanza che non è in contatto con l’oggetto, l’area o il fenomeno investigato”. (Papale e Barbati, 2005).

Grazie alla possibilità di osservare grandi porzioni di superficie terrestre e territori remoti, di effettuare misure frequenti e regolari nel tempo e data la capacità di investigare nelle diverse bande dello spettro elettromagnetico, il telerilevamento permette di indagare fenomeni non direttamente accessibili all’esperienza umana e situazioni in atto, difficilmente identificabili in altro modo.

Le attuali applicazioni dei dati telerilevati sono molto ampie e forniscono un prezioso supporto a diversi settori di ricerca, commerciali e operativi: gestione delle risorse nel settore agricolo, forestale e della pesca, esplorazione di giacimenti di materie prime, ottenimento di informazioni ambientali, monitoraggio e gestione dello sviluppo urbano, gestione del rischio, ecc. Queste applicazioni hanno interesse sia a scala globale sia a livello nazionale e locale.

I vantaggi sopracitati, insieme ai costi relativamente bassi per unità di superficie osservata, rendono il telerilevamento particolarmente attraente per i paesi in via di sviluppo dove, spesso, si registra l’assenza di informazioni affidabili relative al territorio e l’aggiornamento delle banche dati esistenti, con metodi di rilievo tradizionali, risulta troppo oneroso.

Nella presente trattazione viene valutato l’impiego di immagini satellitari multispettrali per la realizzazione di mappe di uso e copertura del suolo della città di Dhaka, capitale del Bangladesh, al fine di studiare la dinamica di sviluppo dell’area urbana e l’evoluzione delle aree soggette a inondazione. La realizzazione di mappe di copertura e uso del suolo e la procedura di *change detection* permettono di valutare i cambiamenti per un rapido aggiornamento dei sistemi di gestione del territorio.

Il caso di studio in esame è stato sviluppato in collaborazione con l'associazione ITHACA (*Information Technology for Humanitarian Assistance, Cooperation and Action*). Fondata nel novembre 2006 dal Politecnico di Torino e dal SiTI (Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali), ITHACA svolge attività finalizzate alla generazione di prodotti cartografici utili al WFP (*World Food Programme*) per la pianificazione degli interventi in caso di eventi calamitosi come terremoti, cicloni e alluvioni.

Il presente lavoro è suddiviso in cinque capitoli. Nel primo capitolo, vengono descritte le componenti fondamentali di un sistema di telerilevamento, le leggi della radiazione elettromagnetica e le sue interazioni con le superfici naturali e l'atmosfera. Sono, inoltre, riportati i diversi tipi di strumenti impiegati nel telerilevamento e le loro caratteristiche operative e funzionali; infine, vengono descritte le principali missioni satellitari per il monitoraggio del territorio e dell'ambiente.

Nel secondo capitolo, viene descritta l'ampia gamma di applicazioni in cui vengono impiegati i dati telerilevati con particolare attenzione alla gestione del territorio (*land use/cover*), all'analisi delle variazioni di destinazione d'uso del suolo (*land use/cover change*) e alla gestione del rischio.

Il terzo capitolo è dedicato alla classificazione delle immagini: vengono descritti i diversi algoritmi di classificazione e la validazione dei prodotti ottenuti da suddette procedure.

Nel quarto capitolo viene esposto il caso di studio; nello specifico, dopo un inquadramento generale sull'area indagata, vengono descritti il materiale e le tecniche di elaborazione di immagini impiegati nella sperimentazione, le problematiche incontrate nella fase di classificazione e i risultati ottenuti.

# CAPITOLO 1 - IL TELERILEVAMENTO

## 1.1 ASPETTI GENERALI

Il telerilevamento (*Remote Sensing*) è una scienza che permette di ottenere di informazioni qualitative e/o quantitative riguardanti un oggetto, un'area o un fenomeno, mediante dati acquisiti da un sistema che non è in diretto contatto con l'oggetto, l'area o il fenomeno indagato; in particolare, il telerilevamento sfrutta la possibilità di rilevare l'assorbimento, l'emissione, la riflessione e la trasmissione dell'energia elettromagnetica da parte di un determinato oggetto. Esso permette, quindi di estendere la capacità di osservazione dell'uomo oltre il suo campo visivo ad esplorare i campi invisibili dello spettro elettromagnetico.

Normalmente, lo studio e l'analisi di un fenomeno o di una superficie effettuati con tecniche di telerilevamento, prevedono tre fasi distinte:

1. Acquisizioni dei dati mediante ripresa da aereo, da satellite o da terra (misure di calibrazione e di controllo);
2. Elaborazione dei dati: correzioni radiometriche, correzioni geometriche, *image processing*;
3. Interpretazione dei dati: produzione di una mappa tematica e verifica dei risultati.

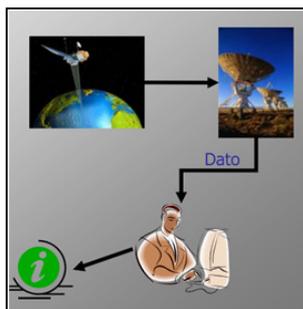


Figura 1 Acquisizione, elaborazione e interpretazione dei dati

Un sistema di telerilevamento, che sfrutta l'energia elettromagnetica come vettore d'informazione, può essere schematizzato mediante i seguenti elementi:

- Sorgente di energia: naturale (sole, terra) o artificiale come la luce di una flash o i segnali a microonde prodotti da un radar. Nel primo caso la Terra riflette una parte dell'energia solare o può emettere

radiazioni proprie, nel secondo caso l'informazione è fornita da una radiazione retrodiffusa.

- Interazione con l'atmosfera: le radiazioni elettromagnetiche nel loro tragitto sorgente-superficie-sensore (o superficie-sensore) interagiscono con l'atmosfera subendo modifiche e distorsioni sotto forma di diffusione e assorbimento che operano in modo diverso alle diverse lunghezze d'onda.
- Interazione con la superficie terrestre: i processi di emissione e riflessione della radiazione dipendono dalle caratteristiche fisico chimiche della superficie con cui interagisce e dalla sua lunghezza d'onda.
- Sensori e rilevatori: strumenti di misura, registrazione e trasmissione della radiazione elettromagnetica. Possono essere semplici sensori fotografici o complessi strumenti elettronici inoltre possono restituire misure o immagini.
- Processo di elaborazione e interpretazione: estrazione delle informazioni sulla superficie terrestre dalle misure di radiazione elettromagnetica.

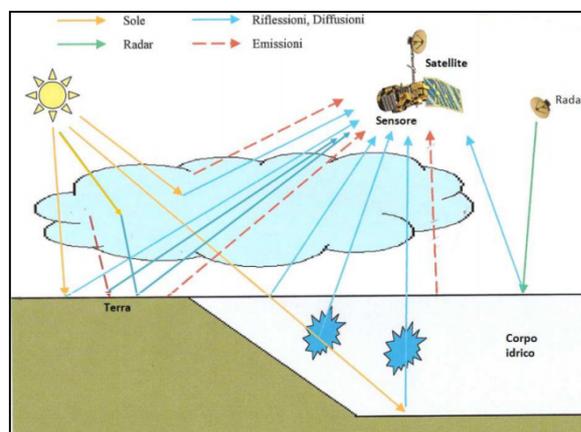


Figura 2 Componenti fondamentali del telerilevamento

(Fonte: <http://cdm.unimo.it/home/dimec/teggi.sergio/Introduzione%20Telerilevamento.pdf>)

## 1.2 LA RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA: LEGGI DELLA RADIAZIONE E INTERAZIONI CON LA MATERIA

Come sopra esposto, il telerilevamento comprende l'insieme delle tecniche in cui l'osservabile fisico è la radiazione elettromagnetica.

La radiazione elettromagnetica è un fenomeno dalla duplice natura: ondulatoria e corpuscolare.

Secondo la teoria ondulatoria (*C. Huygens*) la radiazione elettromagnetica si propaga nello spazio sottoforma di onde sinusoidali caratterizzate da due campi perpendicolare l'uno all'altro: quello elettrico (E) e quello magnetico (M).

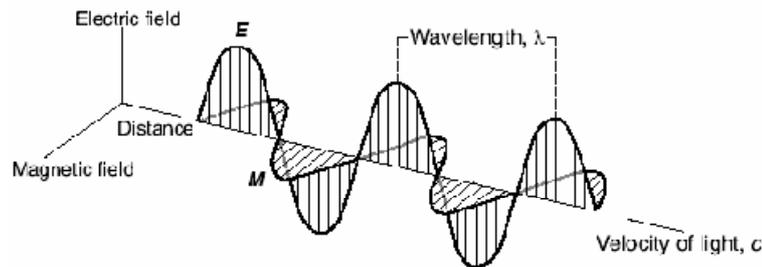


Figura 3 I vettori di campo elettrico (E) e magnetico (M) di un'onda elettromagnetica  
(Fonte: <http://pcfarina.eng.unipr.it>)

Un'onda sinusoidale viene descritta da due parametri:

- lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) ovvero la distanza tra due picchi successivi misurata in  $\mu\text{m}$  o  $\text{nm}$ ;
- frequenza ( $\nu$ ) ovvero il numero di oscillazioni che l'onda compie nell'unità di tempo, misurata in Hertz e che rappresenta l'inverso del periodo di oscillazione T.

I due parametri sono legati dalla relazione:  $c = \lambda \cdot \nu$  dove  $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  è la velocità di propagazione dell'onda nel vuoto.

I diversi tipi di onda elettromagnetica vengono classificati sul cosiddetto spettro elettromagnetico ovvero l'insieme continuo di tutte le possibili lunghezze d'onda che, convenzionalmente, è suddiviso in bande spettrali:

- Ultravioletto (UV 0,01 – 0,38  $\mu\text{m}$ );
- Visibile (VIS 0,38 – 0,75  $\mu\text{m}$ );
- Infrarosso (IR 0,75  $\mu\text{m}$  – 1 mm);
- Microonde (MW 1 mm – 1 cm).

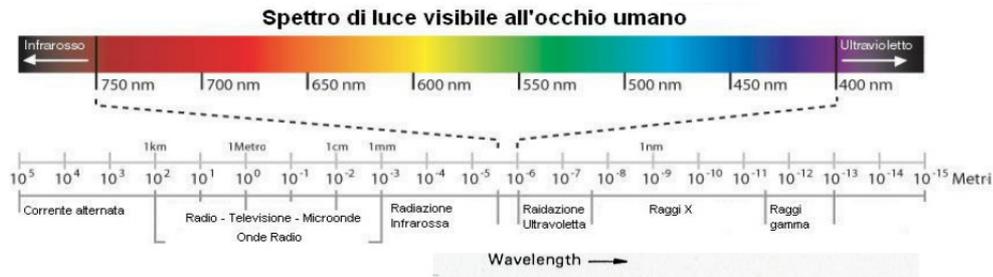


Figura 4 Lo spettro elettromagnetico  
 (Fonte: <http://www.smfn.unical.it/files/cdl/sgeologiche/4159lezione6.pdf>)

Relativamente alla teoria delle particelle, la radiazione elettromagnetica è composta da unità discrete dette fotoni; ciascun fotone trasporta una quantità di energia pari a:

$$q = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad [J]$$

dove  $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  costante di Planck.

Tale energia può essere espressa attraverso una serie di grandezze radiometriche:

- Energia radiante: energia totale dell'onda

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i = \sum_{i=1}^n h \cdot \nu_i \quad [J]$$

- Flusso radiante: energia radiante nell'unità di tempo

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad [W]$$

- Densità di flusso radiante: flusso radiante emesso (Exitanza M) o assorbito (Irradianza E) per unità di superficie

$$M \text{ o } E = d \frac{\Phi}{dA} = \frac{d^2\Phi}{dA dt} \quad [W/m^2]$$

- Radianza: densità di flusso radiante emessa da una unità di superficie vista attraverso un angolo solido unitario  $\theta$ ;  $dA \cdot \cos\theta$  è la proiezione della superficie unitaria nella direzione dell'angolo solido.

$$L = d \left( \frac{d\Phi}{dA \cdot \cos\theta} \right) \cdot \frac{1}{d\omega} \quad [W/m^2/Sr]$$

Ciascuna grandezza sopracitata può essere espressa in funzione della lunghezza d'onda poiché il comportamento radiometrico di un corpo varia a seconda della lunghezza d'onda considerata; si ha quindi:

- Flusso radiante spettrale:  $\Phi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda}$  [W/μm]
- Exitanza spettrale:  $M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda}$  [W/m<sup>2</sup>/μm]
- Irradianza spettrale:  $E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}$  [W/m<sup>2</sup>/μm]
- Radianza spettrale:  $L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda}$  [W/m<sup>2</sup>/Sr/μm]

Quando un'onda elettromagnetica colpisce la superficie di un oggetto, il flusso radiante incidente  $\Phi$  viene in parte riflesso ( $\Phi_r$ ), in parte assorbito ( $\Phi_a$ ) e in parte trasmesso ( $\Phi_t$ ).

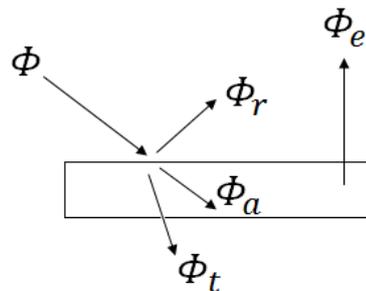


Figura 5 Interazione onda elettromagnetica - superficie

Per descrivere ciò, si fa riferimento ai seguenti coefficienti adimensionali:

- Riflettanza  $\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi}$
- Assorbanza  $\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi}$
- Trasmittanza  $\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi}$

In equilibrio termodinamico si ha:  $\rho + \alpha + \tau = 1$ .

Tali indici sono importanti per l'identificazione delle superfici investite dall'onda elettromagnetica poiché ogni materiale è caratterizzato da specifici valori di  $\rho$ ,  $\alpha$  e  $\tau$ .

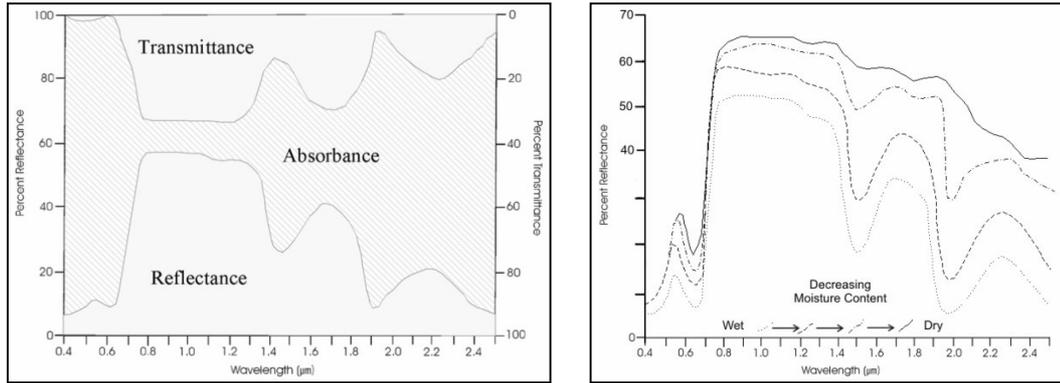


Figura 6 Caratteristiche spettrali della vegetazione nel VIS, NIR e MIR e curve di riflettanza spettrale della vegetazione in funzione del tenore di umidità delle foglie  
 (Fonte: <http://www.cps-amu.org/sf/notes/m1r-1-8.htm>)

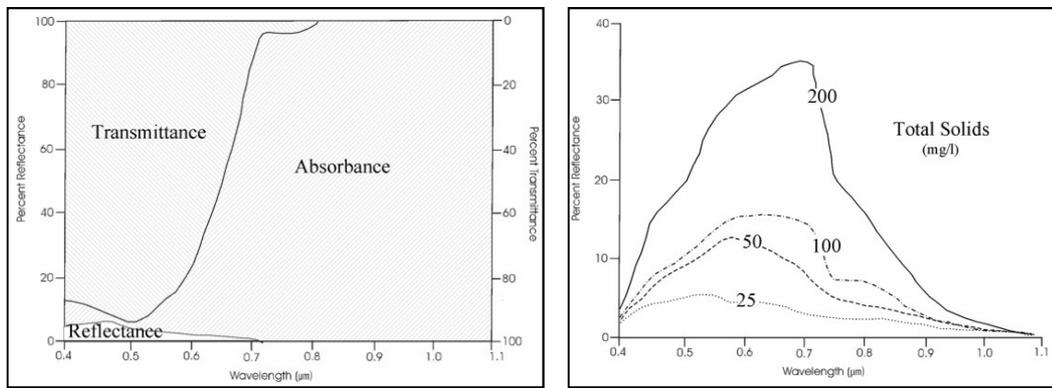


Figura 7 Caratteristiche spettrali dell'acqua nel VIS, NIR e MIR e curve di riflettanza spettrale dell'acqua in funzione del contenuto di solidi sospesi  
 (Fonte: <http://www.cps-amu.org/sf/notes/m1r-1-8.htm>)

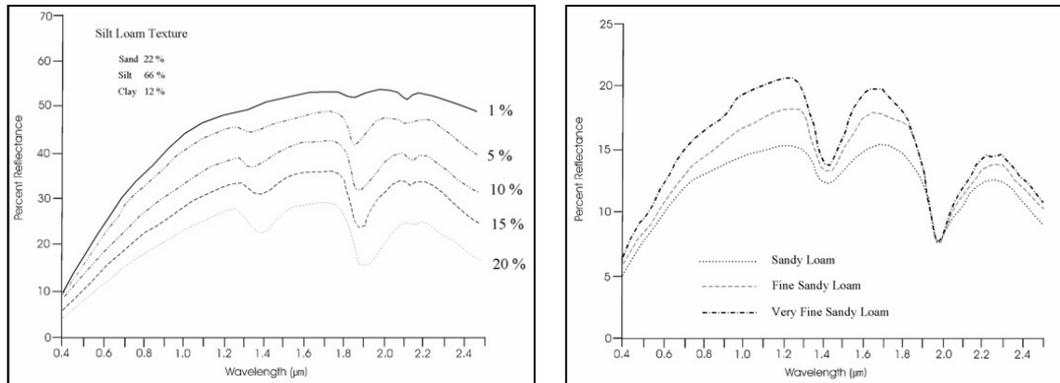


Figura 8 Curve di riflettanza spettrale del suolo in funzione del contenuto di umidità e curve di riflettanza spettrale del suolo in funzione della tessitura del suolo  
 (Fonte: <http://www.cps-amu.org/sf/notes/m1r-1-8.htm>)

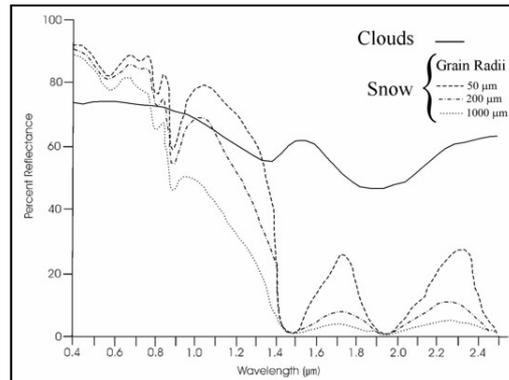


Figura 9 Curva di riflettanza spettrale delle nuvole e curve di riflettanza spettrale della neve in funzione della dimensione dei cristalli nel VIS, NIR e MIR  
(Fonte: <http://www.cps-amu.org/sf/notes/m1r-1-8.htm> )

L'atmosfera è il mezzo attraverso il quale l'energia elettromagnetica viaggia dalla sorgente alla superficie e da questa al sensore. Essa interagisce con la radiazione attraverso i fenomeni di diffusione ed assorbimento determinando le caratteristiche dell'energia che raggiunge il sensore. In particolare tali fenomeni possono essere di tipo selettivo ovvero si verificano soltanto in corrispondenza di certe lunghezze d'onda, oppure di tipo non selettivo.

Per quanto riguarda la diffusione, a seconda del rapporto tra le particelle in sospensione presenti nell'atmosfera e la lunghezza d'onda della radiazione si distinguono:

- Diffusione di Rayleigh: si verifica quando la radiazione elettromagnetica interagisce con particelle che sono più piccole della lunghezza d'onda; l'effetto della diffusione di Rayleigh è inversamente proporzionale alla quarta potenza della lunghezza d'onda per cui le lunghezze d'onda più corte vengono diffuse di più di quelle più lunghe; ad esempio la radiazione corrispondente al violetto viene diffusa 10 volte in più di quella corrispondente al colore rosso: è questo il motivo del colore blu del cielo.
- Diffusione di Mie: si verifica quando la dimensione prevalente delle particelle è comparabile con la lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica; nell'atmosfera, le fonti più importanti di diffusione di Mie sono i cosiddetti *aerosol* (miscela di vapor acqueo e polveri).

- Diffusione non selettiva: si verifica quando la dimensione prevalente delle particelle è maggiore della lunghezza d'onda della radiazione; interessa tutte le lunghezze d'onda ed è una caratteristica delle particelle di vapor d'acqua: è questo il motivo per cui le nuvole appaiono bianche.

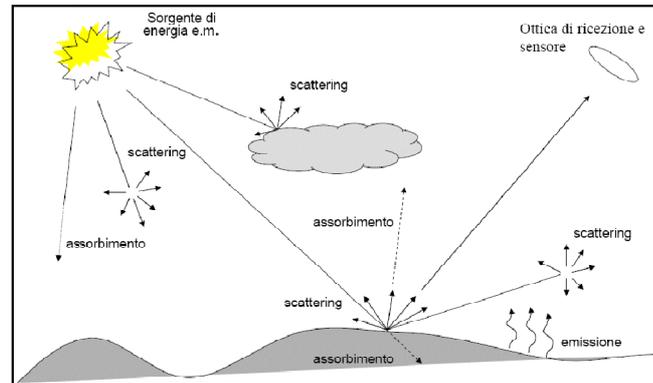


Figura 10 Interazione della radiazione solare con l'atmosfera e con la superficie terrestre  
(Fonte: *Introduzione al telerilevamento per l'osservazione della Terra* – G. Trianni  
Università degli studi di Pavia)

I gas atmosferici che maggiormente interagiscono con la radiazione, causandone l'assorbimento, sono il vapore acqueo, anidride carbonica, l'ossigeno e l'ozono. Esistono regioni dello spettro in cui, essendo minime o nulle le perdite dovute all'assorbimento, la radiazione è trasmessa. Queste sono le cosiddette finestre atmosferiche:

- 0.35 - 0.75  $\mu\text{m}$ , nel VIS;
- 0.7 - 1.3  $\mu\text{m}$ , 1.5 - 1.8  $\mu\text{m}$ , 2.0 - 2.8  $\mu\text{m}$ , nell'IR riflesso;
- 3 - 4  $\mu\text{m}$ , nell'IR termico vicino;
- 8 - 14  $\mu\text{m}$ , nell'IR termico medio;
- tutta la regione delle microonde.

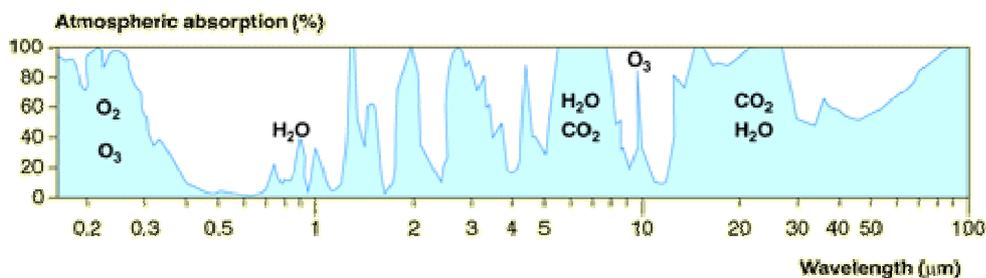


Figura 11 Finestre di trasmissione e componenti atmosferici che danno assorbimento  
(Fonte: [www.eduspace.esa.int](http://www.eduspace.esa.int))

## 1.3 SENSORI, PIATTAFORME E REQUISITI OPERATIVI

### 1.3.1 Sensori

Gli strumenti utilizzati nel telerilevamento per misurare la radiazione elettromagnetica emessa, riflessa o trasmessa da un oggetto vengono, generalmente, chiamati sensori.

Il sensore è un dispositivo elettronico in grado di catturare e misurare la radiazione elettromagnetica ovvero la quantità di fotoni che lo raggiungono. Esso è composto da:

- sistema ottico di lenti che collezioni la radiazione;
- filtri in grado di separare le bande spettrali;
- uno o più rilevatori di segnale (*detectors*);
- convertitore analogico-digitale.

La superficie del sensore è formata da milioni di “fotositi” (pixel) disposti secondo una griglia regolare; ciascun fotosito fornisce in uscita una carica elettrica proporzionale alla quantità di fotoni che lo ha colpito; la carica generata viene poi convertita in valore numerico dal circuito di conversione analogico-digitale: si ottiene un’immagine digitale dove i valori relativi a ciascun pixel (DN = *Digital Number*) indicano la radianza media giunta al sensore e proveniente dalla superficie a terra che ricade nel pixel. In una immagine multispettrale la radianza è misurata in più intervalli dello spettro elettromagnetico e per ciascuno di questi viene creata la matrice di DN.

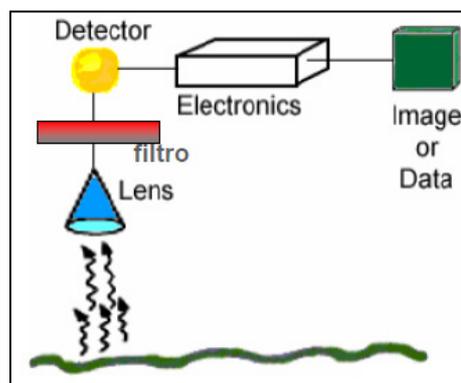


Figura 12 Schema generico di un sensore  
(Fonte: Fundamentals of Remote Sensing - CCRS/CCT)

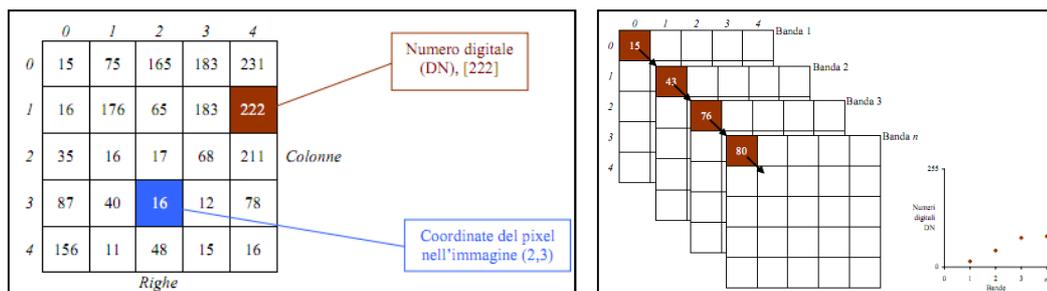


Figura 13 Immagine digitale e immagine multispettrale  
(Fonte: <http://archeologiamedievale.unisi.it/labinfo2/Testi/ImageProcessing.pdf>)

Innanzitutto, in base al principio di misura, tali strumenti di rilevamento possono essere suddivisi in sensori passivi e sensori attivi. I sensori passivi rilevano la radiazione solare riflessa dall'oggetto osservato; in particolare, la riflessione della radiazione solare incidente può avvenire solo quando il sole illumina l'oggetto in osservazione, pertanto non di notte. I sensori attivi, invece, rilevano la risposta riflessa da un oggetto irradiato da una fonte di energia generata artificialmente da loro stessi; per cui, il vantaggio principale di tali sensori, rispetto a quelli passivi, è la possibilità di effettuare misure ad ogni ora del giorno e della notte e in ogni condizione meteorologica.

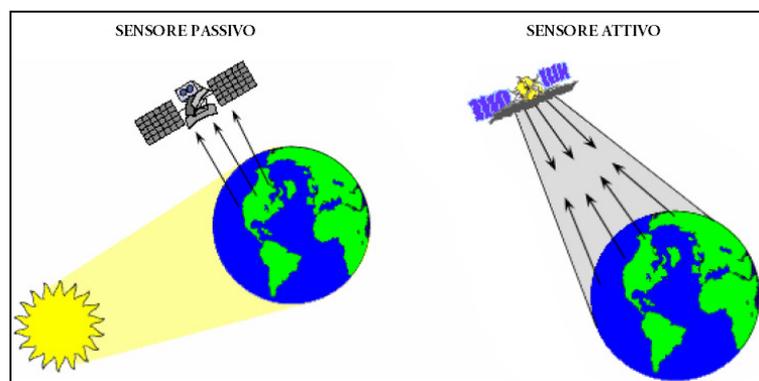


Figura 14 Sensori passivi e sensori attivi

Attivi			
Satellite		Sensori	Ente
ENVISAT	1	ASAR- Advanced Synthetic Aperture Radar	ESA- Europa
ERS 1 e 2	1	AMI- Active Microwave	ESA- Europa
	2	SAR- Synthetic Aperture Radar	
PRIRODA-MIR	1	ALISSA - Atmosphere par Lidar Sur Saliout	Russian Space agency RKA
RADARSAT- 1	1	SAR- RadarSat	RadarSat International- Canada

Passivi			
Satellite		Sensori	Ente
LANDSAT 5	1	MSS- Multispectral Scanner	NASA- USA
	2	TM - Thematic Mapper	
SPOT 5	1	Doris- Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite	CNES- Francia
	2	VEGETATION 2	
	3	HRG- High Resolution Geometric	
	4	HRS- High Resolution Stereoscopic	
QUIKBIRD	1	Quikbird	DigitalGlobe
NOAA 14-18	1	AMSU-A- Advanced Microwave Sounding	NOAA- USA
	2	AVHRR/3- Advanced Very High Resolution Radiometer	
	3	HIRS/4- High Resolution Infra Red Radiation Sounder	
	4	MHS- Microwave Humidity Sounder	
	5	SBUV/2- Solar Backscatter Ultra violet instrument	
TERRA	1	Aster- Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	NASA- USA
	2	Modis- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer	

Figura 15 Panoramica dei principali sensori attivi e passivi  
(Fonte: *Integrazione, trattamento e distribuzione dei dati territorio - ambiente acquisiti da sensori a bordo di piattaforme satellitari, aeree, terrestri, veicolari e marine* – S. dalla Costa)

A seconda dell'intervallo di lunghezze d'onda rilevate, i sensori si suddividono in:

- sensori ultravioletti;
- sensori elettro-ottici (VIS, IR);
- sensori a microonde;
- sensori termici.

I sensori, ma anche le immagini da essi acquisite, possono essere classificati anche in base al loro campionamento spettrale ovvero in funzione del numero di bande dello spettro elettromagnetico da essi rilevato; si individuano, quindi:

- sensori pancromatici (registrano una sola banda spettrale molto ampia solitamente tra 0,5-0,9  $\mu\text{m}$ , corrispondente alla parte visibile dello spettro);
- sensori multispettrali (registrano 2-10 bande spettrali);
- sensori iperspettrali (registrano più di 20 bande spettrali in genere contigue).

### 1.3.2 Piattaforme

Le piattaforme (*Bus*) su cui sono montati i sensori per il telerilevamento sono i satelliti artificiali. Essi percorrono orbite ellittiche o circolari, cercando di mantenere costante la distanza satellite-superficie terrestre. In particolare, tali orbite possono essere diverse in termini di altitudine, orientamento e rotazione rispetto alla Terra.

Satelliti che operano su orbite quasi circolari, ad una altezza di 36.000 km rispetto all'equatore e che vedono la stessa porzione di terra per tutto il tempo, hanno un'orbita definita geostazionaria. Essi, muovendosi ad una velocità confrontabile con la rotazione della Terra, sono sincronizzati con la rotazione terrestre: hanno un periodo orbitale uguale a quello della Terra (23 ore, 56 minuti e 4 secondi) e appaiono fermi e sospesi su un punto dell'equatore. Queste caratteristiche permettono ai satelliti geostazionari di osservare e collezionare informazioni in continuo su specifiche aree; è il caso dei satelliti meteorologici. Uno svantaggio delle orbite geostazionarie risiede nella grande distanza dalla Terra che riduce la risoluzione spaziale raggiungibile nell'ordine dei chilometri.

Molte piattaforme di telerilevamento sono progettate per seguire un'orbita (di norma Nord-Sud) che, insieme alla rotazione della terra (Ovest-Est), consente di coprire la maggior parte della superficie della terra in un determinato periodo di tempo: queste orbite sono definite quasi-polari per l'inclinazione dell'orbita relativa ad una linea congiungente i poli. Molte di esse sono elio-sincrone ovvero coprono una certa area sulla Terra ad un'ora locale del giorno costante. Ciò assicura condizioni di illuminazione conformi al momento di acquisizione dell'immagine in una specifica stagione in anni successivi, oppure sopra un'area particolare per una serie di giorni. Questa caratteristica dei satelliti eliosincroni è di fondamentale importanza per il monitoraggio dei cambiamenti avvenuti in una certa area con il passare del tempo nonché per la mosaicatura di immagini adiacenti. I satelliti che seguono orbite eliosincrone volano ad una quota compresa tra i 150 e i 900 km e hanno un periodo orbitale di 90-110 minuti.

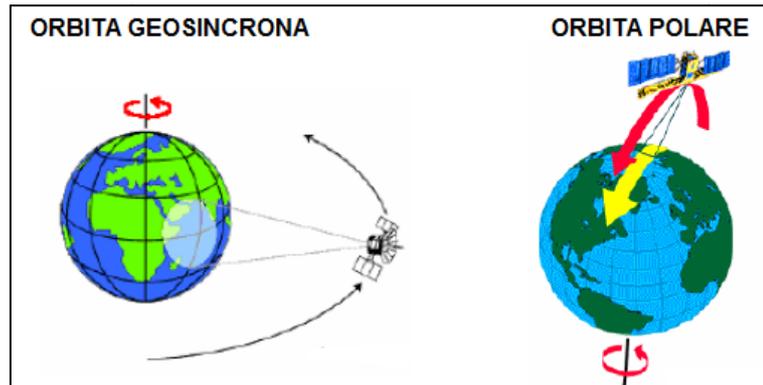


Figura 16 Orbita geosincrona e polare  
(Fonte: <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>)

### 1.3.3 Modalità di acquisizione

L'acquisizione di immagini satellitari può avvenire mediante due modalità di rilevamento differenti:

- WHISK-BROOM (scanner across-track);
- PUSH-BROOM (scanner along-track).

La modalità WHISK-BROOM comporta l'acquisizione di uno o più pixel per volta formando altrettante linee in direzione trasversale rispetto alla linea di volo, grazie alla rotazione di uno specchio; la strisciata è formata accostando linee (o gruppi di linee) successive, seguendo il movimento della piattaforma.

La scansione in modalità PUSH-BROOM comporta l'acquisizione di una riga di pixel per volta, disposta in direzione trasversale rispetto al moto del sensore. Lo spostamento da una linea alla successiva è dovuto al moto della piattaforma; non servono infatti altre parti in movimento.

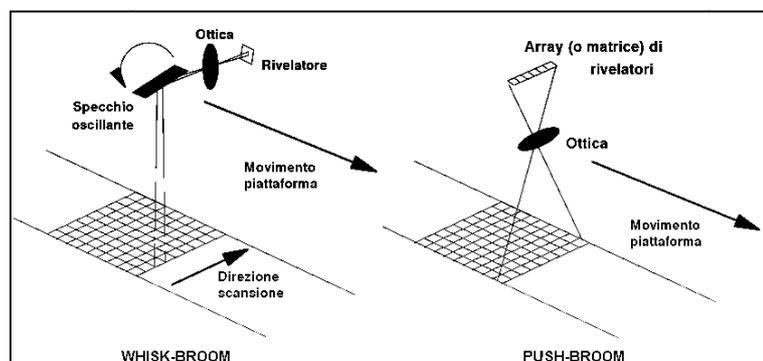


Figura 17 Tecniche di scansione  
(Fonte: *Sensori di Telerilevamento* - N. Pierdicca Università "La Sapienza" di Roma)

In modalità WHISK-BROOM serve un numero inferiore di sensori rispetto all'altra tecnica di scansione e ciò comporta una migliore omogeneità delle misure e minori problemi di calibrazione; occorre, però, un meccanismo aggiuntivo in movimento, che peggiora l'affidabilità e può introdurre vibrazioni; si ha poco tempo a disposizione per registrare il singolo pixel ed è, quindi, difficile ottenere alta potenza di segnale. In modalità PUSH-BROOM ogni sensore ha più tempo a disposizione per registrare un pixel, il che migliora la risoluzione radiometrica e/o geometrica; non si hanno parti in movimento ma è laborioso calibrare tutti i sensori, per cui si possono avere delle disomogeneità nelle misure.

In funzione della velocità con cui avviene la scansione, l'acquisizione può essere sincrona o asincrona. Nel primo caso la velocità di scansione del sensore sul satellite è uguale alla velocità al suolo del satellite per cui vengono acquisite immagini lungo la traccia a terra del satellite o parallelamente ad essa. In modalità asincrona, invece, la velocità di scansione è minore della velocità al suolo del satellite per cui il satellite può ruotare all'indietro mentre procede lungo l'orbita consentendo ai detector di stazionare su ogni area il tempo necessario all'acquisizione.

#### **1.3.4 Requisiti operativi e funzionali**

Per scegliere il sensore più adatto all'osservazione di un determinato fenomeno occorre conoscere i requisiti operativi e funzionali del sensore stesso; in particolare, la qualità dei dati acquisiti mediante tecniche di telerilevamento, dipende da alcune caratteristiche specifiche degli strumenti impiegati quali:

- risoluzione geometrica;
- risoluzione radiometrica;
- risoluzione spettrale;
- risoluzione temporale.

La risoluzione geometrica è l'area minima vista dal sensore oltre la quale due oggetti a terra non sono più distinguibili, ovvero corrisponde alle dimensioni dell'elemento di superficie minima riconoscibile nell'immagine (il pixel). La risoluzione geometrica dipende dalle caratteristiche del

sensores ( $f$  = distanza focale e  $D$  = dimensione del detector) e dalla quota ( $H$ ) a cui esso è posizionato, per cui è preferibile fornire il valore dell'IFOV (*Istantaneous Field Of View*) che rappresenta l'angolo diedro di visibilità del sensore o l'area al suolo sottesa dalla proiezione di un pixel del sensore, al di sotto dei quali il sensore non riesce più a distinguere due oggetti fisicamente separati:

$$IFOV_{\alpha} = \frac{D}{f} \text{ (rad)}$$

$$IFOV_L = H \cdot \frac{D}{f} \text{ (m)}$$

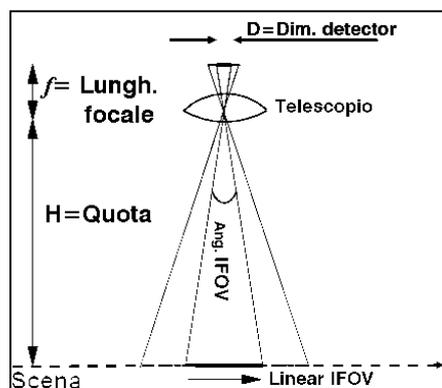


Figura 18 Risoluzione geometrica dei sensori elettro-ottici  
(Fonte: *Sensori di Telerilevamento* - N. Pierdicca Università "La Sapienza" di Roma)

È importante sottolineare che un oggetto, per essere osservabile, deve avere dimensioni uguali o maggiori della cella di risoluzione, che risponderà con un segnale mediato su tutto ciò che si trova al suo interno. Analogamente ai sistemi ottici, la piattaforma su cui montano i sensori attivi avanza nella direzione di volo, ma gli impulsi sono trasmessi obliquamente rispetto al Nadir; si parla, quindi, di risoluzione trasversale e longitudinale. La risoluzione trasversale  $\rho_g$  (*ground range*) dipende dall'ampiezza  $\rho_s$  dell'impulso nella direzione *slant range* e dalla profondità dell'illuminazione lungo la direzione dell'azimuth; la risoluzione longitudinale  $\rho_a$  (azimuth) è determinata dalla profondità angolare dell'impulso e dalla distanza *slant range*. Tale misura è inversamente proporzionale alla lunghezza dell'antenna, ovvero una antenna più lunga produce un impulso più vicino e quindi una risoluzione maggiore. Una

buona risoluzione si può anche ottenere riducendo l'ampiezza dell'impulso o aumentando le dimensioni dell'antenna.

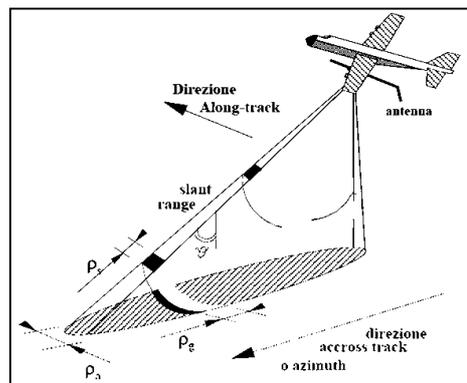


Figura 19 Risoluzione spaziale dei sensori attivi

La risoluzione radiometrica rappresenta la minima differenza di intensità che un sensore riesce a registrare tra due valori di energia raggiante. Nel caso di dati digitali, essa dipende dalla quantità di memoria dedicata a ciascun valore registrato: se un'immagine è acquisita con 8 bit di memoria si hanno a disposizione 256 ( $2^8$ ) valori di intensità luminosa possibili che ogni pixel può assumere. Maggiore è il numero di bit di memoria a disposizione maggiore è la risoluzione radiometrica poiché maggiore è il numero di livelli con cui è possibile rappresentare i dati acquisiti dal sensore.

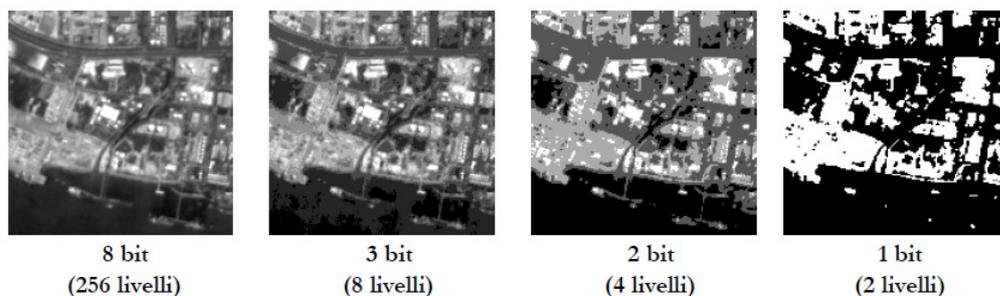


Figura 20 Confronto tra risoluzioni radiometriche  
(Fonte: <http://www.robortoconfalonieri.it>)

La risoluzione spettrale rappresenta la capacità del sensore di distinguere diverse lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico: indica il numero, la larghezza e la posizione della bande spettrali di acquisizione. Sensori a bande molto strette soffrono di un rapporto segnale/rumore basso con diminuzione della risoluzione radiometrica; al contrario, sensori che operano a banda larga hanno una buona risoluzione radiometrica.

La risoluzione temporale rappresenta il tempo intercorso tra due riprese successive della stessa area e dipende dai parametri orbitali dei satelliti su cui sono posizionati i sensori.

## **1.4 MISSIONI PER LO STUDIO E IL MONITORAGGIO DEL TERRITORIO E DELL'AMBIENTE**

### **1.4.1 Satelliti ad alta risoluzione spaziale**

Le immagini e i prodotti derivati da sensori montati a bordo di questi satelliti sono utilizzati principalmente per applicazioni di tipo fotogrammetrico, ovvero per la realizzazione o l'aggiornamento di cartografia a scala locale. Le immagini derivate possono essere fuse ad altre immagini provenienti da sensori multispettrali, consentendo il miglioramento della risoluzione spaziale dei dati provenienti da quest'ultimi (*pan-sharpened*), oppure è possibile sovrapporre due immagini della stessa scena acquisite con differenti angoli di veduta o due passaggi consecutivi e realizzare stereocoppie di immagini che aggiungono l'informazione sulla quota e da cui è possibile creare modelli digitali del terreno (*DTM Digital Terrain Model*).

### **IKONOS**

Il satellite Ikonos lanciato nel settembre 1999 dalla compagnia americana *Space Imaging*, ed operativo dall'inizio del 2000, è stato il primo satellite commerciale ad alta risoluzione.

Il satellite è di tipo eliosincrono e su di esso è montato un sensore che acquisisce sia in modalità pancromatica sia multispettrale (3 bande del visibile e 1 banda nell'infrarosso vicino) nell'intervallo spettrale tra 0.45 e 0.90  $\mu\text{m}$ . La risoluzione geometrica al suolo varia per le due modalità da 1 a 4 m. La risoluzione radiometrica è di 11 bit.

La piattaforma Ikonos è di tipo *agile platform* per cui il satellite, potendosi orientare in qualunque direzione, ha la capacità di acquisire coppie stereo sia lungo la sua orbita sia lungo orbite adiacenti.

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande	Tipo
1.0 - PAN	11 bit	1 gg	680	11.3	450 – 900 nm	PUSHBROOM
4.0 - XS	11 bit				B: 450 – 530 nm V: 520 – 610 nm R: 640 – 720 nm NIR: 760 – 880 nm	STEREO a richiesta

Figura 21 Caratteristiche missione Ikonos

Space Imaging fornisce direttamente dati e prodotti con il marchio *CarterraTM*, è comunque possibile richiederli anche a distributori locali: in Italia, i dati Ikonos sono distribuiti da Planetek Italia.

Le immagini sono suddivise nelle seguenti tipologie di prodotto:

- *CarterraTM Geo & Geo Ortho Kit*: prodotti corretti radiometricamente e georeferenziati ovvero corretti geometricamente e proiettati su un ellissoide con proiezione cartografica definita, ma senza punti di controllo a terra;
- *CarterraTM Orthorectified*: prodotti orto rettificati secondo una specifica proiezione cartografica definita dall'utente; l'ortoproiezione è realizzata mediante modello di elevazione del terreno e alcuni punti di controllo a terra;
- *CarterraTM Stereo*: coppie stereo georeferenziate fornite con il modello della camera.

## QUICKBIRD

Il satellite QuickBird, lanciato nel 2001 dalla *Digital Globe* e operativo dal 2002, opera su un'orbita polare eliosincrona posta a 450 km di altezza ed è caratterizzato da una swath di 16,5 Km.

QuickBird monta un sensore pancromatico con una risoluzione di 0,61 m (0,72 m off-nadir) e un sensore multispettrale con risoluzione di 2,44 m (2,88 m off-nadir).

Risoluzione geometrica nadirale	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande	Tipo
0.61 m	11 bit	1 gg	450	16.5	450 – 900 nm	PUSHBROOM
2.44 m	11 bit				B: 450 – 520 nm V: 520 – 600 nm R: 630 – 690 nm NIR: 760 – 900 nm	STEREO a richiesta

Figura 22 Caratteristiche missione QuickBird

Come Ikonos, QuickBird è un satellite del tipo *agile platform* ed è quindi dotato di capacità stereoscopiche.

I dati QuickBird sono distribuiti in esclusiva per tutta Europa da *Eurimage*. Le immagini QuickBird, sono suddivisi in 3 categorie a secondo del livello di elaborazione a cui sono sottoposti prima della distribuzione:

- *Basic Imagery*: immagini corrette radiometricamente;
- *Standard Imagery*: immagini sottoposte a correzioni radiometriche e geometriche;
- *Ortho*: immagini corrette radiometricamente e ortorettificate.

### GeoEye-1

Lanciato il 6 settembre del 2006 e di proprietà della *GeoEye Inc.* (ex *ORBIMAGE*) GeoEye-1 è il satellite commerciale per l'osservazione della Terra con la migliore risoluzione spaziale: 0,41 m nel pancromatico e 1,65 m nel multispettrale. Percorre un'orbita eliosincrona ad un'altezza di 681 km e dispone di un tempo di rivisitazione di meno di tre giorni.

È già in progetto il lancio di un secondo satellite, probabilmente nel 2013, chiamato GeoEye-2 con risoluzione ancora più avanzate.

<b>Risoluzione spaziale</b>	
<b>Sensore pancromatico</b>	0,41 metri x 0,41 metri
<b>Sensore multispettrale</b>	1,65 metri x 1,65 metri
<b>Range spettrale</b>	450-800 nm, 450-510 nm (blu) 510-580 nm (verde) 655-690 nm (rosso) 780-920 nm (vicino IR)
<b>Larghezza Swath</b>	15,2 km
<b>Off-Nadir Imaging</b>	Fino a 60 gradi
<b>Dynamic Range</b>	11 bit per pixel
<b>Vita missione attesi</b>	> 10 anni
<b>Tempo di rivisitare</b>	Meno di 3 giorni
<b>Altitudine orbitale</b>	681 km

Figura 23 Caratteristiche del satellite GeoEye-1  
(Fonte: <http://www.geoeye.com>)

### EROS

I satelliti della missione EROS (*Earth Resources Observation Satellite*) sono gestiti dalla società israeliana *ImageSat International* che, con il

lancio del primo satellite nel 2000, è divenuta la prima società non statunitense in grado di commercializzare prodotti ad alta risoluzione. La missione è composta da due differenti tipologie di satelliti: EROS A e EROS B; attualmente sono operativi i satelliti EROS A1 e EROS B1.

EROS A1 è il primo della costellazione di 8 satelliti prevista *ImageSat International*; lanciato il 5 Dicembre 2000, il satellite è posto in orbita polare eliosincrona ad una altitudine di 500 km; esso monta un sensore pancromatico a 1,8 metri di risoluzione con la possibilità di campionare ulteriormente il dato fino ad una risoluzione sub-metrica (*Hypersampled mode*). EROS B1, è stato lanciato nel 2006 e ha un aspetto simile a EROS A; è posto ad un'altezza di 500 km e monta a bordo un sensore pancromatico con risoluzione spaziale di 0,70 m.

La particolare caratteristica della missione EROS è la capacità di puntamento che permette ai satelliti di essere puntati e stabilizzati in breve tempo sul sito di interesse del cliente a partire da una ripresa al nadir, perpendicolarmente alla superficie, fino a raggiungere un'inclinazione massima di ripresa pari a 45° con azimuth selezionabile nei 360°.

Le immagini EROS sono acquistabili direttamente da Imagesat ed è possibile ottenere i dati *raw*, radiometricamente corretti, geometricamente corretti e infine ortorettificati.

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande	Tipo
1.8	11 bit	1 gg	500	14	500 – 900 nm	PUSHBROOM STEREO Asincrono

Figura 24 Caratteristiche del satellite EROS A1

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande	Tipo
0.7	10 bit	1 gg	500	7	500 – 900 nm	PUSHBROOM STEREO Asincrono

Figura 25 Caratteristiche del satellite EROS B1

### ORVIEW-3

Si tratta di un satellite gestito da *Digital Globe* e operativo dal 2003 in orbita circolare di 470 km. La dimensione della scena registrata è 8 km.

Il satellite monta un sensore analogo per risoluzione spettrale a quello di Ikonos, ovvero con tre bande nel visibile e una nell'infrarosso vicino e un canale pancromatico. Anche risoluzione radiometrica e spaziale sono analoghe: le immagini sono registrate a 11 bit e la risoluzione a terra è di 1 m in modalità pancromatica e di 4 m in modalità multispettrale.

I tre prodotti principali sono il *Basic*, corretto radiometricamente, il *Geo*, proiettato su mappa ma solo con dati di posizione del satellite e l'*Ortho*, ortorettificato.

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande	Tipo
1	11 bit	< 3 gg	470	8	450-900 nm	PUSHBROOM
4					450-520 nm 520-600 nm 625-695 nm 760-900 nm	STEREO a richiesta

Figura 26 Caratteristiche missione Orbview-3

## FORMSAT-2

Il satellite FORMOSAT-2, sviluppato dal NSPO (*National Space Organization*) di Taiwan, è stato lanciato con successo il 21 maggio 2004, segue un'orbita eliosincrona e si trova a 891 km dal suolo. Oltre a fornire immagini per le esigenze domestiche di Taiwan, il satellite viene spesso utilizzato per il monitoraggio di eventi catastrofici (maremoto in Asia del 2006, uragano Katarina nel 2005, tifoni sul pacifico, ecc.).

Dall'aprile del 2010 i dati FORMOSAT-2 sono messi a disposizione dal GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*).

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale max	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande	Tipo
2	11 bit	1 gg	891	24	450 - 900 nm	PUSHBROOM
8	11 bit				B: 450 - 520 nm V: 520 - 600 nm R: 630 - 690 nm NIR: 760 - 900 nm	

Figura 27 Caratteristiche del satellite FORMSAT-2

## CARTOSAT

CARTOSAT-1 e CARTOSAT-2 sono satelliti ad alta risoluzione spaziale costruiti da ISRO (*Indian Space Research Organization*), destinati principalmente alle applicazioni cartografiche in India. Essi sono dotati di due telecamere operanti nel pancromatico che osservano la stessa area

da due angolazioni diverse permettendo, così, l'acquisizione di immagini stereoscopiche nella regione visibile.

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande	Tipo
2,5	10 bit	5 gg	618	30	500 -850 nm	PUSHBROOM - STEREO

Figura 28 Caratteristiche CARTOSAT-1

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande	Tipo
1	10 bit	4 gg	630	9,6	500 -850 nm	PUSHBROOM - STEREO

Figura 29 Caratteristiche CARTOSAT-2

## SPOT

La sigla SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*) si riferisce alla costellazione di satelliti francesi per lo studio delle risorse terrestri.

Satellite	Data di lancio	Fine servizio
SPOT 1	22 febbraio 1986	31 dicembre 1990
SPOT 2	22 gennaio 1990	30 luglio 2009
SPOT 3	26 settembre 1993	14 novembre 1997
SPOT 4	24 marzo 1998	operante
SPOT 5	4 maggio 2002	operante

Figura 30 I satelliti SPOT

(Fonte: [http://www.geoimage.com.au/geoweb/spot/spot\\_overview.htm](http://www.geoimage.com.au/geoweb/spot/spot_overview.htm))

Attualmente sono presenti in orbita due satelliti tra cui il più recente è il satellite SPOT 5 lanciato nel 2002 e con caratteristiche tecnologiche avanzate rispetto agli'altri. Il satellite segue un'orbita polare eliosincrona a 832 km di quota e monta a bordo i seguenti sensori:

- HRG (*High Resolution Geometric*);
- HRS (*High Resolution Stereoscopic*) per l'acquisizione di immagini stereoscopiche;
- VEGETATION 2 per monitoraggio delle produzioni agricole, delle aree desertiche, della deforestazioni a scala globale ecc.

Il processamento denominato SUPERMODE offre un miglioramento della risoluzione geometrica, in modalità pancromatica, da 5 m a 2,5 m, e permette anche di produrre, attraverso la combinazione con le bande multispettrali a 10 metri di risoluzione, immagini a colori a 2,5 m di risoluzione.

I dati sono distribuiti da *Spot Image* o da distributori locali (nazionali) con differenti livelli di pre-processamento.

### 1.4.2 Satelliti ad alta risoluzione spettrale

Sono principalmente sensori iperspettrali in grado di registrare un numero molto rilevante di bande. Tuttavia alcuni sensori, pur non essendo associabili ai sensori iperspettrali, sono in grado di registrare un numero consistente di bande e sono, in genere, impiegati per la classificazione d'uso e copertura del suolo.

#### LANDSAT

Il programma LANDSAT consiste in una serie di missioni satellitari per l'osservazione della Terra, portato avanti congiuntamente dalla NASA e dall'USGS (*US Geological Survey*). La serie di satelliti LANDSAT, ha segnato la storia del telerilevamento, soprattutto nel campo del monitoraggio della superficie terrestre: i dati LANDSAT sono utilizzati, ormai da oltre 40 anni, al fine di studiare l'ambiente, le risorse, e i cambiamenti naturali e artificiali avvenuti sulla superficie terrestre. Il primo satellite LANDSAT fu lanciato nel 1972 mentre il più recente, il Landsat 7, è operativo dal 1999. Attualmente sono in orbita, quasi-polare eliosincrona, i satelliti 5 e 7.

LANDSAT 1	1972 - 1978
LANDSAT 2	1975 - 1982
LANDSAT 3	1978 - 1983
LANDSAT 4	1982 - 2001 data downlink capability failed in 1993
LANDSAT 5	1984 -
LANDSAT 6	failed launch, 1993
LANDSAT 7	1999 -

Figura 31 Evoluzione del programma LANDSAT  
(Fonte: <http://eoedu.belspo.be/en/satellites/landsat.htm>)

Il satellite LANDSAT 5 monta i sensori MSS (Multi Spectral Scanner), a 4 bande spettrali, e TM (*Thematic Mapper*), a 7 bande di cui una nell'infrarosso termico. Il sensore MSS ha smesso di acquisire dati nel 1992.

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale max	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande ( $\mu\text{m}$ )	Tipo
30	8 bit	16 gg	705	185	b1: 0.45 – 0.52 b2: 0.52 – 0.60 b3: 0.63 – 0.69 b4: 0.76 – 0.90 b5: 1.55 – 1.75 b7: 2.08 – 2.35	WHISKBROOM Multispettrale
120	8 bit				b6: 10.4 – 12.5	WHISKBROOM Termico

Figura 32 Caratteristiche del sensore TM sul satellite LANDSAT 5

Il satellite LANDSAT 7 è dotato di un sensore multispettrale noto come ETM+ (*Enhanced Mapper Plus*). Tale sensore è una versione migliorata del sopracitato TM; infatti, esso acquisisce anche una banda pancromatica e la banda 6, nel termico, ha una risoluzione spaziale di 60 m contro i 120 m del sensore TM.

Nel 2003 è stato rilevato un malfunzionamento a bordo del Landsat 7 che ha riguardato lo *Scan Line Corrector* (SLC). Il problema sembra essere permanente e pertanto il Landsat 7 continua ad acquisire in modalità SLC-Off. Ciò produce delle anomalie nelle immagini che risultano più evidenti lungo i margini della scena.

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale max	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande ( $\mu\text{m}$ )	Tipo
15	8 bit	16 gg	705	183	0.520 - 0.900	WHISKBROOM PANCROMATICO
30	8 bit				b1: 0.45 – 0.515 b2: 0.525 – 0.605 b3: 0.630 – 0.690 b4: 0.750 – 0.900 b5: 1.550 – 1.750 b7: 2.090 – 2.350	WHISKBROOM Multispettrale
60	8 bit				b6: 10.4 – 12.5	WHISKBROOM

Figura 33 Caratteristiche ETM+ LANDSAT 7

Grazie alle diverse bande con cui operano, i satelliti LANDSAT sono i più utilizzati per lo studio di vegetazione, espansione urbana, uso/copertura del suolo e relativi cambiamenti (è possibile reperire numerose scene d'archivio per costruire analisi multitemporali).

In base al livello di correzione, le immagini LANDSAT sono così suddivise:

- L0R (*Level 0 Reformatted data product*): è il dato grezzo; i pixel non sono né ricampionati né geometricamente corretti o registrati;
- L1R (*Radiometrically Corrected*): immagini di livello L0R radiometricamente corrette;

- L1G (*Geometrically Corrected*): è il prodotto standard, corretto a livello radiometrico e geometrico, su parametri richiesti dall'utenza;
- L1T (*Terrain Correction*): immagini sottoposte a correzione radiometrica e geometrica incorporando punti di controllo a terra e utilizzando un modello digitale di elevazione (DEM) per la precisione topografica.

Dal giugno 2009, l'intero archivio immagini Landsat è disponibile online senza alcun costo; è possibile ottenere tali immagini dal sito USGS usando come interfaccia *Earth Explorer* o dal sito USGS GLOVIS.

### EO-1

Il satellite EO-1 (*Earth Observing*), lanciato dalla NASA nel 2000, segue un'orbita a 705 km ed è caratterizzato da un tempo di rivisitazione di 16 giorni e da swath di 7,7 km. Monta a bordo 3 strumenti:

- ALI *Advanced Land Imager*,
- *Hyperion* spettrometro a 220 bande, nell'intervallo da 0,4 a 2,5  $\mu\text{m}$ , risoluzione spaziale di 30 metri
- (LEISA) *Linear Etalon Imaging Spectrometer Array*

Le immagini acquisite dal satellite EO-1 sono archiviate e distribuite dall'USGS *Center for Earth Resources Observation and Science* (EROS), e da altri distributori locali, come *Geoserve*.

	Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale max	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande ( $\mu\text{m}$ )	Tipo
<b>Hyperion</b>	30	12 bit	16 gg	705	7.5	b1/b5 0.35-0.39 UV b6/16 0.40-0.50 blu b17/25 0.51-0.69 verde b26/35 0.60-0.70 rosso b36/64 0.71-0.99 NIR I b71/86 0.85-1.00 NIR II b65/70 1.00-1.05 SWIR I b87-242 1.01-2.57 SWIR II	PUSHBROOM
<b>ALI Advanced Land Imager</b>	30	12 bit			37	0.48-0.69 panchromatic 0.433-0.453 VNIR (blue) 0.45-0.515 VNIR (blue) 0.525-0.605 VNIR(green) 0.63-0.69 VNIR (red) 0.775-0.805 VNIR 0.845-0.89 VNIR 1.2-1.3 SWIR 1.55-1.75 SWIR 2.08-2.35 SWIR	PUSHBROOM

Figura 34 Caratteristiche dei sensori montati su EO-1

### TERRA-EOS

Il satellite Terra della Nasa fa parte del programma EOS (*Earth Observing System*), un sistema integrato di satelliti in orbita polare per l'osservazione della superficie della terra, della biosfera, dell'atmosfera e degli oceani.

Il satellite Terra è stato lanciato nel 1999 ed è operativo dal 2000. La quota di orbita è di 705 chilometri e il tempo di rivisitazione di 16 giorni; monta a bordo 5 sensori di cui i più importanti sono:

- ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*);
- MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*);

Il sensore ASTER si pone l'obiettivo di contribuire allo studio dei fenomeni locali e globali relativi alla superficie terrestre e all'atmosfera. Lavora in 14 bande: 2 nel visibile, 2 nell'infrarosso vicino, 6 nell'infrarosso medio e 5 nell'infrarosso termico. La risoluzione spaziale varia tra i 15 metri, nelle bande del visibile e infrarosso vicino, e i 90 metri nell'infrarosso termico. La scena acquisita misura 60 km. Con i dati ASTER è possibile realizzare modelli digitali del terreno, condurre analisi geologiche, monitorare l'evoluzione dei ghiacciai, identificare la copertura del suolo, analizzare lo sviluppo urbano e della vegetazione, monitorare vulcani e incendi.

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale max	Quota (Km)	Swath (Km)	Bande (µm)	Tipo
15	8 bit	16 gg	705	60	B1: 0.52-0.60 B2: 0.63-0.69 B3Nadir: 0.78-0.86 B4Back: 0.78-0.86	PUSHBROOM stereo
30	8 bit				B5: 1.60-1.70 B6: 2.145-2.185 B7: 2.185-2.225 B8: 2.235-2.285 B9: 2.295-2.365 B10: 2.360-2.430	PUSHBROOM
90	12 bit				B11: 8.125-8.475 B12: 8.475-8.825 B13: 8.925-9.275 B14: 10.25-10.95 B15: 10.95-11.65	WHISKBROOM

Figura 35 Caratteristiche del sensore ASTER

Lo spettroradiometro MODIS, montato a bordo anche del satellite Aqua che fa sempre parte del programma EOS, lavora invece in 36 bande e la sua risoluzione spaziale varia da 250 m (banda 1-2) ai 500 metri (bande 3-7) fino ai 1.000 metri (bande 8-36). I dati MODIS sono utilizzati negli studi per la comprensione dei cambiamenti a livello globale.

Risoluzione geometrica Nadirale (m)	Risoluzione radiometrica	Risoluzione temporale max	bande	Quota (Km)	Swath (Km)	Tipo
250	12 bit	1-2 gg	1-2	705	2330	WHISKBROOM
500	12 bit		3-7			WHISKBROOM
1000	12 bit		8-36			WHISKBROOM

Figura 36 Caratteristiche del sensore MODIS

I dati TERRA sono distribuiti, a seconda del tipo di dato richiesto, da diversi enti e uffici della NASA: GES DISC (*Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center*) fornisce i dati Modis.

## ENVISAT

Il satellite ENVISAT, progettato e costruito dall'ESA (*European Space Agency*), è stato lanciato nel 2002; segue un'orbita polare eliosincrona ad un'altezza di 790 km che gli garantisce una ripetitività al suolo di 35 giorni; monta strumenti sia attivi sia passivi, tra cui:

- MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*): sensore con 15 bande e 300 metri di risoluzione al nadir per l'osservazione della superficie terrestre e dei vari strati dell'atmosfera;

Band centre (nm)	Bandwidth (nm)	Potential Applications
412.5	10	Yellow substance, turbidity
442.5	10	Chlorophyll absorption maximum
490	10	Chlorophyll, other pigments
510	10	Turbidity, suspended sediment, red tides
560	10	Chlorophyll reference, suspended sediment
620	10	Suspended sediment
666	10	Chlorophyll absorption
681.25	7.5	Chlorophyll fluorescence
705	10	Atmospheric correction, red edge
753.75	7.5	Oxygen absorption reference
760	2.5	Oxygen absorption R-branch
775	15	Aerosols, vegetation
865	20	Aerosols corrections over ocean
890	10	Water vapour absorption reference
900	10	Water vapour absorption, vegetation

Risoluzione geometrica nadirale: 300 m  
Risoluzione radiometrica: 12 bit  
Risoluzione temporale: 3 giorni  
Quota: 790 km  
Swath: 1150 m  
Tipo: Pushbroom

Figura 37 Caratteristiche del sensore MERIS

- MIPAS (*Michelson Interferometric Passive Atmospheric Sounder*): spettrometro IR-infrarosso ad alta risoluzione per lo studio delle problematiche dovute al buco dell'ozono, agli scambi termici tra troposfera e stratosfera e alle concentrazioni di gas dovuti ad attività antropiche;
- ASAR (*Advanced Synthetic-Aperture Radar*): radar SAR ad alta risoluzione per il monitoraggio di onde marine, movimenti di calotte

- polari e ghiacciai montani, movimenti tettonici e osservazione di catastrofi naturali come inondazioni e terremoti;
- GOMOS (*Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars*): spettrometro per lo studio dell'ozonofera;
  - RA-2 (*Radar Altimeter*): radar altimetrico per l'analisi dell'altitudine della superficie terrestre e della topografia marina;
  - SCIAMACHY (*Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography*): stima le tracce dei vari gas per lo studio dei fenomeni, come incendi, inquinamento industriale, tempeste di sabbia, eruzioni vulcaniche, che influenzano la chimica atmosferica;
  - AATSR (*Advanced Along-Track Scanning Radiometer*): misura la temperatura superficiale degli oceani e stima le biomasse, il loro contenuto di umidità e la loro crescita.

ESA e *Spot Image* sono i distributori dei dati disponibili e dei prodotti realizzati su richiesta. La disponibilità dei dati è visibile sul sito <http://cat.envisat.esa.int>.

### WorldView-2

WorldView-2, satellite commerciale di proprietà della società *Digital Globe*, è entrato in orbita l'8 ottobre 2009 ed è previsto che rimanga operativo fino al 2017. Percorre un'orbita eliosincrona a un'altitudine di 770 km e offre una risoluzione spaziale nel pancromatico di 0,46 m e di 1,85 m nel multispettrale (8 bande).

<b>Sensor Bands</b>	Panchromatic: 450 - 800 nm 8 Multispectral: Coastal: 400 - 450 nm      Red: 630 - 690 nm Blue: 450 - 510 nm      Red Edge: 705 - 745 nm Green: 510 - 580 nm      Near-IR1: 770 - 895 nm Yellow: 585 - 625 nm      Near-IR2: 860 - 1040 nm
<b>Sensor Resolution</b>	Panchromatic: 46 cm GSD at nadir*, 52 cm GSD at 20° off-nadir Multispectral: 1.85 m GSD at nadir*, 2.07 m GSD at 20° off-nadir
<b>Dynamic Range</b>	11-bits per pixel
<b>Swath Width</b>	16.4 kilometers at nadir

Figura 38 Caratteristiche del satellite WorldView-2  
(Fonte: <http://www.digitalglobe.com>)

### 1.4.3 Satelliti ad alta risoluzione temporale

Sono principalmente i satelliti geostazionari che, per le caratteristiche dell'orbita e naturalmente per gli scopi per cui sono stati realizzati, monitorano la terra costantemente. In questo contesto, poiché si intende porre l'attenzione su strumenti e dati relativi al territorio e all'ambiente a scala locale, si riportano satelliti meteorologici, utilizzati anche per lo studio e il monitoraggio degli oceani, dei ghiacciai e in generale per lo studio dei cambiamenti climatici. Oltre ai satelliti geostazionari è possibile annoverare tra i satelliti ad alta risoluzione temporale, satelliti commerciali ad alta risoluzione spaziale e i satelliti della serie NOAA, nati principalmente per applicazioni meteorologiche, ma ad oggi molto utilizzati anche per l'osservazione della terra.

#### METEOSAT

Il sistema Meteosat è una costellazione di satelliti meteorologici geostazionari, posizionati ad un'altezza di circa 36.000 km, sotto il controllo di EUMETSAT (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*). I satelliti Meteosat sono utilizzati per previsioni meteorologiche, indagini sul clima e cambiamenti climatici. Essi sono riconducibili a tre diversi programmi:

- programma MOP (*Meteosat Operational Programme*): satelliti di prima generazione;
- programma MTP (*Meteosat Transition Programme*) pensato per assicurare continuità operativa tra la fine del MOP e l'inizio del progetto;
- programma MSG (*Meteosat Second Generation*), che ha iniziato la sua missione all'inizio del 2004.

Meteosat-1 (M-A)	1977 - 1979
Meteosat-2 (M-B)	1981 - 1988
Meteosat-3 (M-P2)	1988 - 1991
Meteosat-4 (MOP1)	1989 - 1994
Meteosat-5 (MOP2)	1991 - 2007
Meteosat-6 (MOP3)	1996 - 2011
Meteosat-7 (MTP1)	1998 -
Meteosat-8 (MSG1)	2004 -
Meteosat-9 (MSG2)	2006 -

Figura 39 Satelliti Meteosat  
(Fonte: <http://www.eumetsat.int>)

Attualmente sono operativi i satelliti Meteosat-7, -8 e -9: Meteosat-7 si trova nell'Oceano Indiano e fornisce un servizio di inoltro dati verso piattaforme di raccolta come boe a sostegno del sistema di allarme tsunami; Meteosat-8 e Meteosat-9 si trovano entrambi sull'Africa; in particolare Meteosat-9 fornisce il principale servizio completo di immagini della Terra in Europa e in Africa (con immagini ogni 15 minuti).

Il sensore primario dei satelliti di seconda generazione è il SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*), che ha la capacità di osservare la Terra in 12 canali spettrali (8 nell'infrarosso, 3 nel visibile e 1 nel vicino infrarosso). La risoluzione spaziale è di 3 km ma il canale HRV (*High Resolution Visible*) offre una risoluzione di 1 km.

SEVIRI (spinning enhanced visible and infrared imager)		
canale	Lunghezza d'onda (μm)	Risoluzione spaziale al punto sotto-satellite
VIS 0.6	0.56 - 0.71	3 km
VIS 0.8	0.74 - 0.88	3 km
NIR 1.6	1.50 - 1.78	3 km
IR 3.9	3.48 - 4.36	3 km
WV 6.2	5.35 - 7.15	3 km
WV 7.3	6.85 - 7.85	3 km
IR 8.7	8.30 - 9.1	3 km
IR 9.7	9.38 - 9.94	3 km
IR 10.8	9.80 - 11.80	3 km
IR 12.0	11.00 - 13.00	3 km
IR 13.4	12.40 - 14.40	3 km
HRV	0.4 - 1.1	1 km

Figura 40 Caratteristiche del sensore SEVIRI  
(Fonte: <http://www.eumetsat.int>)

## NOAA

I satelliti TIROS, poi NOAA serie 12-18, in orbita quasi polare a 870 km, sono gestiti dalla *National Oceanographic Atmospheric Administration* (NOAA), organo governativo statunitense. I dati ricavati da questi satelliti vengono impiegati da tutti i Paesi per lo studio di oceani, vegetazione e agricoltura e per la ricostruzione dello stato termodinamico dell'atmosfera. Attualmente i satelliti NOAA operativi sono tre: il 16, il 17 e il 18 mentre il 15 funziona essenzialmente da riserva.

Satellite name	Launch date	Service start	Service end
TIROS-N	13 Oct 1978	19 Oct 1978	30 Jan 1980
NOAA-6	27 Jun 1979	27 Jun 1979	16 Nov 1986
NOAA-7	23 Jun 1981	24 Aug 1981	7 Jun 1986
NOAA-8	28 Mar 1983	3 May 1983	31 Oct 1985
NOAA-9	12 Dec 1984	25 Feb 1985	11 May 1994
NOAA-10	17 Sep 1986	17 Nov 1986	31 Aug 2001
NOAA-11	24 Sep 1988	8 Nov 1988	13 Sep 1994
NOAA-12	13 May 1991	14 May 1991	15 Dec 1994
NOAA-14	30 Dec 1994	30 Dec 1994	23 May 2007
NOAA-15	13 May 1998	13 May 1998	Present
NOAA-16	21 Sep 2000	21 Sep 2000	Present
NOAA-17	24 Jun 2002	24 Jun 2002	Present
NOAA-18	20 May 2005	30 Aug 2005	Present
NOAA-19	6 Feb 2009	2 Jun 2009	Present

Figura 41 Satelliti NOAA  
(Fonte: <http://www.oso.noaa.gov/poesstatus/>)

Il sensore a bordo delle missioni NOAA, più rilevante per l'osservazione della Terra, è l'AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*): acquisisce 6 bande nel campo del visibile-rosso e dell'infrarosso e del termico; progettato per applicazioni di meteorologia, i dati da esso acquisiti sono utilizzati anche per il monitoraggio della temperatura superficiale sia marina sia terrestre e per studi sulla vegetazione terrestre, sull'agricoltura (umidità dei suoli) e per la localizzazione e il monitoraggio di incendi e vulcani.

La maggior parte dei dati è reperibile e acquistabile online, da siti dell'ESA, della NASA e naturalmente del NOAA.

AVHRR/3 Channel Characteristics			
Channel Number	Resolution at Nadir	Wavelength (um)	Typical Use
1	1.09 km	0.58 - 0.68	Daytime cloud and surface mapping
2	1.09 km	0.725 - 1.00	Land-water boundaries
3A	1.09 km	1.58 - 1.64	Snow and ice detection
3B	1.09 km	3.55 - 3.93	Night cloud mapping, sea surface temperature
4	1.09 km	10.30 - 11.30	Night cloud mapping, sea surface temperature
5	1.09 km	11.50 - 12.50	Sea surface temperature

Figura 42 Caratteristiche del sensore AVHRR  
(Fonte: <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>)

#### 1.4.4 Sensori attivi

##### ERS-2

ERS-2 (*European Remote-Sensing Satellite*), lanciato dall'ESA (*European Space Agency*) il 21 aprile del 1995, segue un'orbita polare eliosicrona a

circa 800 km di quota. Esso è l'evoluzione del satellite ERS-1 (lanciato il 17 luglio 1991 e non più operativo dal 10 marzo 2000): allo strumento ATSR sono state aggiunte delle bande nel visibile ed è stato aggiunto lo strumento GOME, spettrometro passivo per il monitoraggio del contenuto di ozono nell'atmosfera. I principali sensori montati sull'ERS-2 sono:

- *Active Microwave Instrument* (AMI) che combina le funzioni di un radar ad apertura sintetica (SAR) e uno scatterometro per il vento (WNS);
- *Radar Altimeter* (RA-1)
- *Along-track scanning radiometer* (ATSR)
- *Global Ozone Monitoring Experiment* (GOME)

L'ATSR, nelle microonde, misura il vapor acqueo atmosferico al fine di aumentare il grado di accuratezza delle misure sulla temperatura degli oceani; l'ATSR nell'infrarosso monitora la copertura nuvolosa, la sua temperatura e la temperatura della superficie dei mari (SST- *Sea Surface Temperature*). Il radar ad apertura sintetica (banda C) viene utilizzato, in ambito ambientale, per localizzare scarichi abusivi di idrocarburi o versamenti accidentali in acqua (chiazze d'olio, inquinanti), e, nel campo dei rischi, per monitorare e valutare l'estensione di esondazioni al fine di stimarne i danni. Il radar altimetrico viene impiegato per lo studio dei ghiacci (misure topografiche, tipi di ghiacci, confine ghiaccio/acqua) e delle correnti marine.

Uno dei risultati più interessanti ottenuti dalle missioni ERS sono stati nel campo dell'interferometria SAR, dove sono state prodotte informazioni topografiche precise accoppiando immagini dell'ERS-1 e dell'ERS-2 che, per circa un anno (dal luglio del 1995 al luglio del 1996), hanno operato in tandem.

La missione ERS-2, come la precedente ERS1 prevede ripetibilità dipendente dai progetti in corso.

### **COSMO-SkyMed**

COSMO-SkyMed (*Constellation of Small Satellites for Mediterranean basin Observation*) è il primo programma spaziale per applicazioni duali

(civili istituzionali/commerciali e militari) pensato e finanziato dall'Agencia Spaziale Italiana (ASI) e dal Ministero della Difesa e sviluppato da un team di industrie nazionali sotto il controllo dell'ASI. Si tratta di una costellazione di quattro satelliti su orbita eliosincrona, lanciati nel periodo 2007-2010, per l'osservazione della Terra mediante un radar ad apertura sintetica (SAR) in banda X (3,75 – 2,75 cm), che può operare sia di giorno sia di notte, anche in caso di nuvolosità.

Il Sistema COSMO-SkyMed è concepito come un sistema multi-missione in grado di integrarsi con altri sistemi spaziali allo scopo di soddisfare le esigenze di una vasta comunità di utenze e può operare in modalità:

- ScanSar;
- StripMap;
- Spotlight;

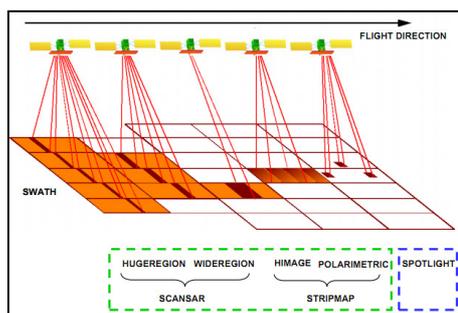


Figura 43 Le tre modalità di acquisizione  
(Fonte: <http://www.cosmo-skymed.it>)

	Spotlight	Stripmap		ScanSAR	
		HIMAGE	Ping Pong	Wide Region	Huge Region
Polarizzazione	Singolo	Singolo	Duale	Singolo	Singolo
Ampiezza dello Swath [kmxkm]	10X10	40X40	30X30	100X100	200X200
Swath	~620 km				
Accessibile					
Risoluzione Geometrica [m]	1	3	15	30	100

Figura 44 Caratteristiche delle tre modalità di acquisizione  
(Fonte: <http://www.cosmo-skymed.it>)

## **CAPITOLO 2 - APPLICAZIONI DEI DATI TELERILEVATI**

Con la possibilità di operare da diverse distanze e in tempi diversi, il telerilevamento introduce una nuova filosofia di controllo e di indagine nello studio del territorio e dei relativi problemi, basata sulla capacità di osservare fenomeni non direttamente accessibili all'esperienza umana e indicatori di situazioni in atto, difficilmente identificabili in altro modo. I dati ottenuti mediante le tecniche di telerilevamento offrono caratteristiche specifiche e presentano vantaggi spesso estremamente significativi:

- possibilità di osservare grandi porzioni di superficie terrestre e territori remoti o di difficile accesso in tempi brevi;
- possibilità di misure frequenti e regolari nel tempo;
- investigazione in svariate bande dello spettro elettromagnetico.

Esistono comunque dei limiti tra cui:

- copertura nuvolosa che rende impossibile l'acquisizione dei dati da satelliti dotati di sensori pancromatici e multispettrali (par.1.3.1 Sensori);
- illuminazione indispensabile per le riprese effettuate con sensori ottici, passivi (par.1.3.1 Sensori);
- difficoltà di reperimento di serie storiche (riprese ad alta risoluzione, da satellite sono disponibili solo dal 1999 quindi, per effettuare paragoni con situazioni in epoche anteriori è necessario utilizzare dati provenienti da fonti diverse).

In generale, le immagini telerilevate risultano utili per un gran numero di applicazioni:

1. Monitoraggio dell'atmosfera: composizione e monitoraggio di sostanze inquinanti in atmosfera, profili meteorologici, precipitazioni, vento;

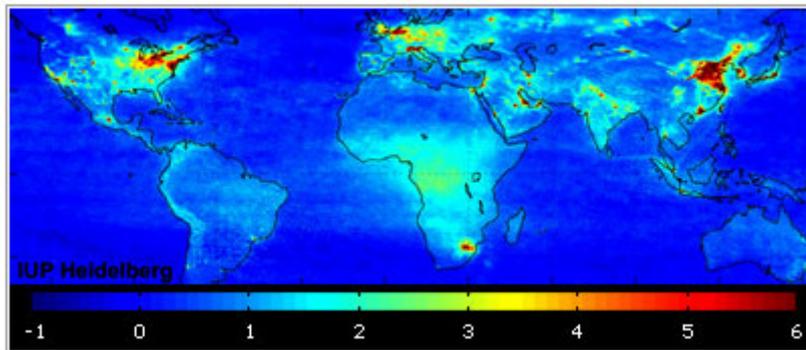


Figura 45 Mappa globale del diossido di azoto sulla base delle misure effettuate dal sensore SCIAMACHY montato su satellite ENVISAT (2004)  
(Fonte: <http://www.esa.int>)

2. Mare e Aree Costiere: gestione delle coste, fenomeni di erosione costiera, monitoraggio aree glaciali e periglaciali, pianificazione e controllo delle rotte nautiche, presenza di alghe, moto ondoso, livello del mare, temperatura, biologia marina, inquinamento acque;

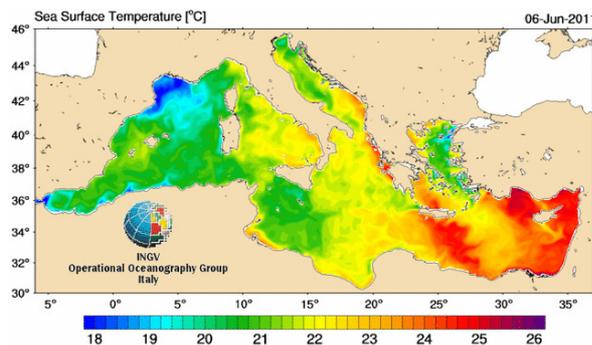


Figura 46 Mappa in tempo reale della temperatura dell'acqua nel mar Mediterraneo e nel mar Tirreno basata sulle osservazioni del sensore AATSR montato sul satellite ENVISAT  
(Fonte: <http://www.eea.europa.eu>)

3. Climatologia: comprensione e valutazione dei processi climatici (desertificazione, aerosol, variazioni di albedo);

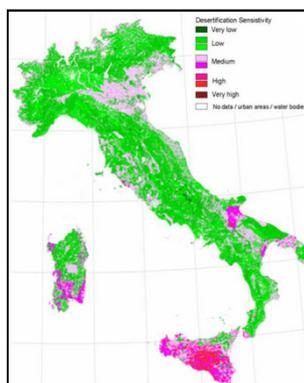


Figura 47 Mappa di sensibilità alla desertificazione relativa al territorio italiano  
(Fonte: <http://www.eea.europa.eu>)

4. Gestione del territorio: classificazione multitemporale di uso e coperture del suolo, inventari risorse, supporto alla pianificazione, valutazione impatto ambientale, monitoraggio inquinamento, discariche e rifiuti urbani e industriali, gestione della rete idrica e aree umide;

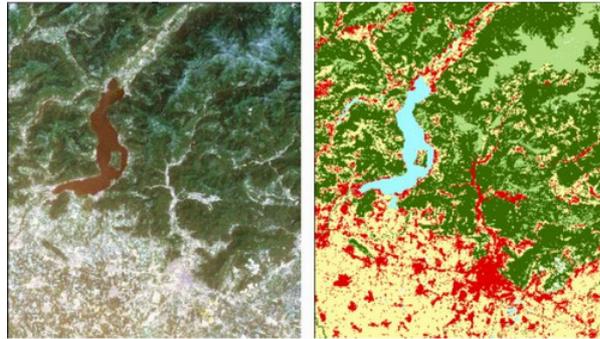


Figura 48 Immagine satellitare Landsat e mappa di uso del suolo da essa ricavata  
(Parte della regione Lombardia, Italia)  
(Fonte: <http://due.esrin.esa.int>)

5. Agricoltura: gestione dei processi produttivi, verifiche di dettaglio di appezzamenti e tipologie di colture, inventario e previsione dei raccolti, controllo delle proprietà, valutazione dei danni post-calamità;

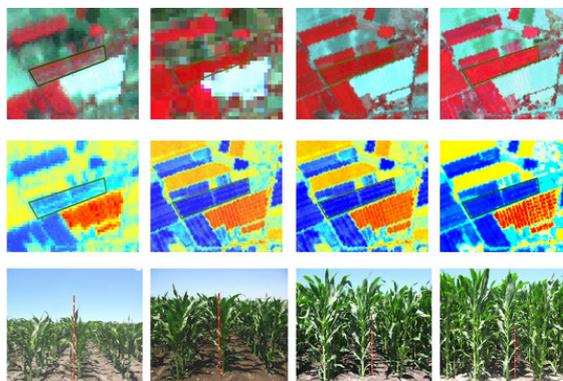


Figura 49 Stadi colturali di una piantagione di mais  
(immagini satellitari, mappe del coefficiente colturale e coltura misurata in campo)  
(Fonte: <http://www.agricoltura.regione.campania.it/>)

6. Scienze Forestali: cartografia forestale, gestione demaniale, monitoraggio aree deforestate o percorse da incendi;

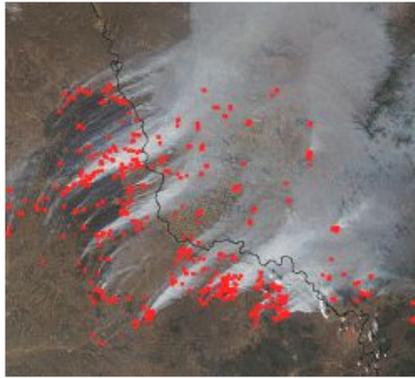


Figura 50 Esempio di rilevamento incendi in area asiatica mediante immagini acquisite dal sensore Modis sul satellite TERRA  
(Fonte: <http://www.meteogiornale.it>)

7. Topografia e Cartografia Tematica: realizzazione gestione ed aggiornamento della cartografia, pianificazione territoriale, catasto, controllo dell'abusivismo edilizio;
8. Geologia e Geologia Applicata: cartografia geologica, esplorazioni marine e terrestri, monitoraggio di attività estrattive, subsidenze, movimenti franosi;

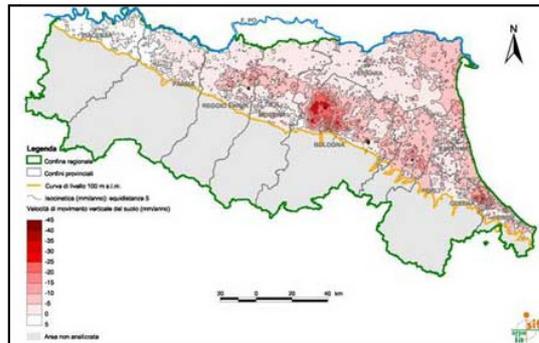


Figura 51 Carta delle velocità di movimento verticale del suolo (2002-2006) realizzata sulla base di analisi interferometrica radar (Emilia-Romagna, Italia)  
(Fonte: <http://www.arpa.emr.it>)

9. Gestione del Rischio: monitoraggio frane, alluvioni, vulcani e terremoti e valutazione dei danni, localizzazione di aree inquinate, pianificazione delle strutture di pronto soccorso;

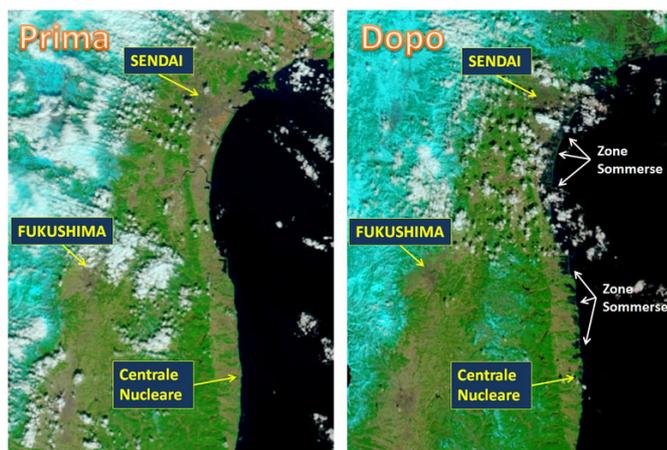


Figura 52 Immagini satellitari acquisite dal sensore Modis montato sul satellite AQUA della costa del Giappone prima e dopo lo Tsunami dell'11 marzo 2011  
(Fonte: <http://www.nasa.gov/>)

10. Difesa del territorio: monitoraggio di obiettivi strategici, pianificazione e preparazione di missioni;
11. Telecomunicazioni: pianificazione e supporto delle reti di trasporto e navigazione a scala urbana e internazionale.

## 2.1 GESTIONE DEL TERRITORIO: LAND USE/COVER

I termini copertura del suolo (*land cover*) e uso del suolo (*land use*) si riferiscono rispettivamente a ciò che si trova sulla superficie terrestre (vegetazione, infrastrutture urbane, suolo nudo, acqua o altro) e al fine di utilizzo del terreno (ricreazione, habitat naturali, agricoltura ecc.).

L'identificazione e la mappatura di copertura e uso del suolo sono di fondamentale importanza per la gestione delle risorse, per le attività di pianificazione nonché per la rilevazione dei cambiamenti (*change detection*) di destinazione. In particolare, è possibile studiare la perturbazione dei terreni agricoli, l'invasione urbana e l'esaurimento delle foreste al fine di sviluppare strategie per la conservazione del territorio e di ridurre le pressioni derivanti dallo sviluppo. Rilevazioni a lungo termine dei cambiamenti della copertura del suolo possono, inoltre, evidenziare un cambiamento delle condizioni climatiche a livello locale o regionale.

Il telerilevamento satellitare offre un mezzo per acquisire e presentare i dati relativi a copertura e uso del suolo in modo tempestivo, ripetitivo e su grandi aree. L'uso combinato di dati ottici ed alle micro-onde, in

concomitanza con tecniche sempre più raffinate di classificazione, permette di individuare con accuratezza le classi di copertura e uso del suolo. Inoltre, l'acquisizione multitemporale di immagini satellitari consente di monitorare i cambiamenti relativi a tali coperture al fine di valutare la riduzione di paesaggio e il conseguente effetto sulle risorse naturali.

### **2.1.1 Lande use/cover change (LULCC): rurale / urbano**

Con l'aumento della popolazione mondiale e con l'allontanamento delle economie nazionali dai sistemi basati sull'agricoltura, le città subiscono una crescita rapida e spesso incontrollata; le variazioni di uso e copertura del suolo, in particolare, la trasformazione di aree rurali in aree urbane, viene controllata per valutare e prevedere la direzione dell'espansione delle città nonché per stimare la densità di popolazione al fine di garantire la pianificazione adeguata del territorio.

L'urbanizzazione è una delle cause di origine antropica più diffuse della perdita di terre arabili, della distruzione degli habitat e del declino della copertura vegetale naturale. In quest'ottica, gli studi relativi al controllo dei cambiamenti di uso e copertura del territorio urbano sono particolarmente importanti perché utili a comprendere i vari impatti delle attività umane sulle condizioni generali dell'ambiente urbano. I cambiamenti di uso e copertura del suolo dovuti alle attività umane attualmente avvengono più rapidamente nei paesi in sviluppo che nel mondo sviluppato, ed è stato previsto che entro l'anno 2020, la maggior parte delle mega città del mondo saranno i paesi in via di sviluppo (Banca mondiale, 2007). L'osservazione costante della Terra mediante satelliti è particolarmente utile nelle zone in cui i cambiamenti sono stati rapidi e i metodi convenzionali di terra sono lenti e incontrano difficoltà nella definizione del centri abitato. Inoltre, archivi digitali di dati telerilevati forniscono l'opportunità di studiare i cambiamenti storici di LULC e di valutare tali cambiamenti in relazione ad altri fattori ambientali e umani.

## **2.2 GESTIONE DEL RISCHIO**

Nel caso di eventi calamitosi, il ricorso al telerilevamento risulta di grande interesse sia nella fase di mitigazione, che comprende tutte le azioni intraprese per la conoscenza del rischio in un dato territorio, sia nella fase di risposta all'evento, che avviene nei giorni successivi all'avvenire dello stesso sia per il monitoraggio nel tempo, inteso come rilievo multitemporale dell'evoluzione del territorio.

Uno dei problemi principali delle aree colpite da disastro, con particolare riferimento ai paesi meno sviluppati, è la mancanza di rilevanti e aggiornate informazioni pre-emergenza che possono contribuire a individuare e valutare il tipo e l'entità del danno. In quest'ottica, il telerilevamento rappresenta la metodologia più adeguata per la caratterizzazione del territorio e, sovrapponendo strati informativi del periodo anteriore e successivo all'evento, per la stima del danno che la calamità ha provocato.

Quando una grande catastrofe colpisce in parti remote del mondo, sapere se la zona è popolata, e quanto densamente, è cruciale per l'efficace organizzazione delle operazioni umanitarie. Questo può aiutare a ridurre i rischi in aree soggette a calamità ricorrenti e a concentrare gli interventi post-disastro nei luoghi più popolati. Poiché il patrimonio edilizio è un indicatore della presenza umana, la conoscenza delle aree abitate può fornire stime relative alla popolazione eventualmente soggetta al rischio catastrofe o, a disastro avvenuto, dare indicazioni sulla popolazione colpita al fine di pianificare con efficacia gli aiuti.

### CAPITOLO 3 - LA CLASSIFICAZIONE DELLE IMMAGINI

L'analisi di un'immagine ha come scopo principale quello di estrarre il contenuto informativo in modo comprensibile all'utente finale; in particolare una delle informazioni richieste può essere l'identificazione delle classi o delle categorie (bosco, acqua, suolo, ecc.) presenti nell'immagine oggetto di studio.

La classificazione è quel processo che permette di ottenere informazioni da immagini satellitari o aeree; in particolare, l'obiettivo della classificazione è quello di associare ai pixel di un'immagine, mediante tecniche automatiche, semi-automatiche o manuali, determinate classi di copertura del suolo. Le classi ottenute dal processo di classificazione sono dette "classi informative" e costituiscono la legenda, definita dall'utente, delle immagini analizzate. Attraverso tale procedura è quindi possibile realizzare delle vere e proprie mappe tematiche in cui per ciascun pixel, oltre le coordinate spaziali, sono note informazioni di tipo semantico legate a una specifica classe o categoria.

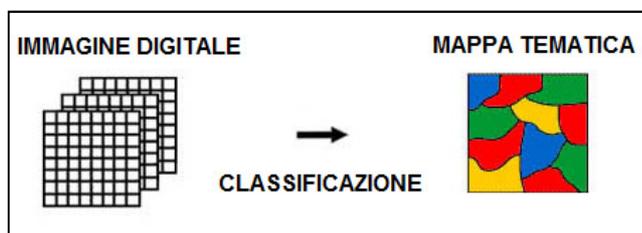


Figura 53 Processo di classificazione  
(Fonte: <http://www.riservamarinamiramare.it>)

La classificazione di un'immagine può essere effettuata tramite interpretazione visiva (metodo soggettivo-qualitativo) o mediante procedure automatiche (metodo oggettivo-quantitativo). Nel primo caso ci si riferisce alle tecniche di fotointerpretazione: un analista esperto identifica nell'immagine gli standard di colore, tessitura (*texture*), struttura, forma, ecc., e li unisce a formare classi prestabilite digitalizzando direttamente sull'immagine i poligoni corrispondenti. La classificazione automatica, caratterizzata da una limitata interazione con l'operatore umano, utilizza specifici algoritmi per definire, dal punto di vista matematico, le caratteristiche identificative di ciascuna classe di

copertura nell'immagine. Nello specifico, la classificazione automatica lavora nello spazio multi-dimensionale delle caratteristiche ovvero lo spazio a n dimensioni dove n è il numero di informazioni a disposizione per ciascun pixel (pari al numero di bande spettrali).

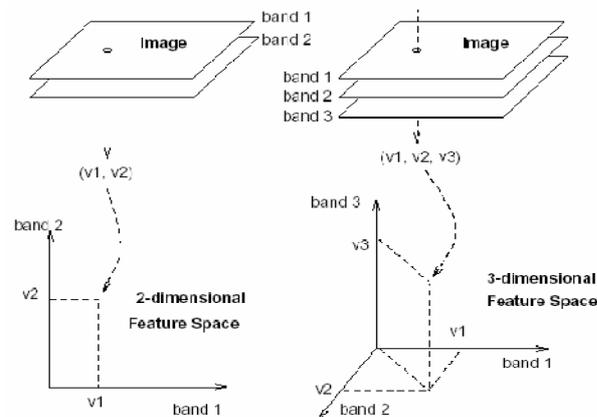


Figura 54 Grafico dei valori di un'osservazione (ovvero di un pixel) nello spazio delle caratteristiche per un'immagine a due e a tre bande  
(Fonte: *Introduzione al telerilevamento per l'osservazione della Terra* – G. Trianni Università degli studi di Pavia)

In generale, l'interpretazione visuale, sostanzialmente grazie alla capacità umana di distinguere le diverse tipologie di copertura, permette di ottenere migliori risultati in termini di accuratezza e precisione; d'altro canto il processo è molto lento in quanto ogni parte dell'immagine deve essere analizzata singolarmente per cui, nella classificazione di aree molto estese, può diventare molto dispendioso in termini di tempo e di denaro. La classificazione automatica, invece, è molto più efficiente quando si ha a che fare con grandi aree e si ha bisogno di risultati nel minor tempo possibile e a costi relativamente bassi.

### 3.1 CLASSIFICAZIONE AUTOMATICA

Il concetto alla base del processo di classificazione è la "similarità" tra oggetti, ovvero sulla base della conoscenza delle proprietà fisiche e delle risposte spettrali delle superfici osservate, ci si aspetta che vettori-misura, associati a pixel rappresentanti la stessa tipologia di oggetti, tendano ad addensarsi in particolari zone dello spazio delle caratteristiche andando così a formare nuvole o raggruppamenti di punti (*cluster*). Inoltre si assume che una parte specifica dello spazio delle caratteristiche

corrisponda ad una specifica classe. Quindi una volta definite le classi nello spazio delle caratteristiche, ogni pixel dell'immagine può essere confrontato con quelle classi e assegnato alla classe corrispondente. Il punto cruciale della classificazione delle immagini risiede quindi nel confronto tra il vettore delle caratteristiche di ciascun pixel e insiemi predefiniti nello spazio delle caratteristiche che rappresentano le diverse classi; si richiede, quindi, la definizione degli insiemi, procedura interattiva effettuata nella fase di addestramento, e dei metodi (algoritmi di classificazione) per effettuare il confronto.

Convenzionalmente le tecniche di classificazione operano supponendo che ogni pixel dell'immagine rappresenti un'unica categoria: classificazione univoca del pixel (classificazione *hard*). A seguito di una classificazione di questo tipo si ottiene una singola mappa tematica caratterizzata da un certo numero di classi. Esistono anche classificatori che, invece, esprimono l'appartenenza di un pixel a una determinata classe in maniera non categorica (classificazione *soft*) e che, quindi, operano associando al singolo pixel più di una classe corredata dal grado di appartenenza; in questo caso si ottiene una mappa per ogni classe ovvero mappe dei gradi di appartenenza.

A seconda di come viene eseguita la fase di addestramento è possibile distinguere due tipologie di classificazione:

- Classificazione supervisionata (*supervised*);
- Classificazione non supervisionata (*unsupervised*).

Nella classificazione supervisionata, l'operatore definisce a priori le classi informative e riconosce un certo numero di pixel come rappresentativi di ciascuna classe ovvero definisce le caratteristiche spettrali delle classi individuando delle aree campione; la classificazione supervisionata necessita, quindi, di una buona conoscenza dell'area trattata. In una classificazione non supervisionata, invece, non sono definite a priori le classi di interesse, quindi, non sono richieste informazioni di anticipo sulle categorie; vengono utilizzati degli algoritmi di clustering (raggruppamento) che, in maniera automatica, suddividono lo spazio delle caratteristiche in

un certo numero di insiemi: l'operatore interviene a posteriori per assegnare a ciascun cluster una classe di copertura del suolo. I cluster prodotti da questa tipologia di classificazione non sono classi d'informazioni, ma classi spettrali (gruppi di pixel con valori di riflettanza simili).

### 3.1.1 Classificazione supervisionata

Una classificazione supervisionata prevede le seguenti fasi:

1. Definizione della legenda: si determinano le classi di copertura da individuare nell'immagine analizzata;
2. Scelta dei *training site*: per ogni classe si scelgono i pixel che costituiranno il campione per l'addestramento del programma che eseguirà la classificazione;
3. Assegnazione delle classi: ad ogni classe viene associata una regola di decisione cosicché è possibile suddividere lo spazio delle caratteristiche in regioni corrispondenti alle classi da assegnare;
4. Applicazione del metodo di assegnazione: il classificatore, mediante un processo automatico e in base ai criteri di decisione precedentemente scelti, assegna un'etichetta a ciascun pixel dell'immagine; si ottiene una mappa tematica in cui compaiono le classi di copertura richieste;
5. Validazione dei risultati: si valuta l'accuratezza della mappa prodotta dalla classificazione confrontando i risultati ottenuti con dati di riferimento.

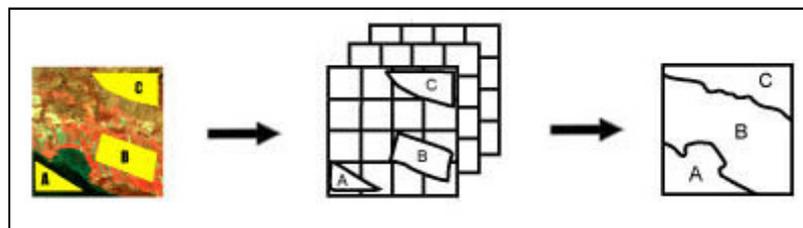


Figura 55 Classificazione supervisionata  
(Fonte: <http://www.riservamarinamiramare.it>)

La fase di addestramento è quella che richiede il maggior tempo d'intervento dell'operatore; l'esperto deve essere in grado di individuare le aree d'interesse nella zona coperta dall'immagine per cui è richiesta una

buona conoscenza del territorio per individuare i *training site* più idonei a seconda delle circostanze e degli obiettivi dello studio.

I *training site* possono essere selezionati mediante:

- sopralluoghi in campo se il terreno è facilmente accessibile;
- cartografia esistente;
- immagini a risoluzione maggiore come fotografie aeree a grande scala;
- interpretazione visuale delle immagini oggetto di studio, sfruttando le diverse elaborazioni di *contrast stretching*.

Un campione di una classe specifica, comprendente un certo numero di pixel di addestramento, forma un insieme nello spazio delle caratteristiche sulla base del quale viene calcolata la firma spettrale di quella classe. I *training site*, devono, quindi, formare un insieme di dati rappresentativo per una determinata classe; a tale scopo, essi vengono selezionati:

- in aree omogenee, rimuovendo gli elementi outlier ovvero i pixel che escono dal cluster della classe nello spazio delle caratteristiche;
- evitando la sovrapposizione tra cluster di classi differenti altrimenti non è possibile una separazione attendibile;
- in zone diverse della stessa immagine per tenere conto della variabilità di una classe all'interno dell'immagine;
- in numero sufficiente: benché esso dipenda dall'algoritmo del classificatore, un utile regola empirica è quella di considerare un numero di pixel di training per ogni classe pari a  $30 \times n$ , dove  $n$  è il numero di bande; per ciascuna classe si avranno almeno  $30 \times n$  vettori del tipo:

$$X_{cij} = (DN_{cij1}; DN_{cij2}; \dots; DN_{cijn})$$

dove:

$DN$  = *digital number* del pixel;

$c$  = classe;

$i$  = riga dell'immagine;

$j$  = colonna dell'immagine;

1, 2, ..., n = banda spettrale.

I vettori rappresentanti ciascuna classe serviranno per il calcolo del vettore medio che a sua volta verrà utilizzato per la classificazione di tutti i pixel dell'immagine:

$$\bar{X}_c = (\overline{DN}_{c1}; \overline{DN}_{c2}; \dots; \overline{DN}_{cn})$$

Una volta selezionati gli insiemi di addestramento viene scelta la regola di decisione per ciascuna classe. Esistono numerosi algoritmi di classificazione; si riportano di seguito i più utilizzati in una classificazione supervisionata.

### CLASSIFICAZIONE A PARALLELEPIPEDO (BOX)

Per ciascuna classe viene tracciato il rettangolo di ingombro ovvero si definiscono il limite inferiore e superiore della classe in base ai valori di massimo e minimo o di media e deviazione standard per ogni classe. Un pixel viene assegnato ad una certa classe se esso ricade all'interno di uno dei riquadri. I pixel che non ricadono in nessuno dei riquadri non vengono classificati.

Uno degli svantaggi di tale metodo è la sovrapposizione delle classi; quando alcune classi si sovrappongono, i pixel che cadono nell'area di sovrapposizione (*overlap*) vengono assegnati in maniera arbitraria ad una delle classi che si sovrappongono. Altro svantaggio è legato alla forma dei cluster; spesso essi risultano allungati per cui l'area del rettangolo comprende anche zone poco rappresentative di quella classe.

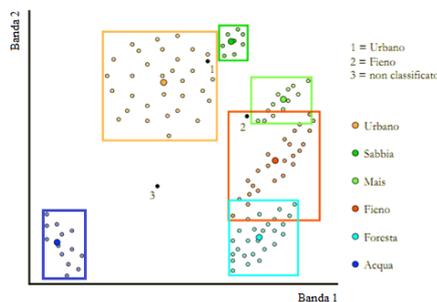


Figura 56 Classificazione a Parallelepipedo  
(Fonte: [http://tlclab.unipv.it/downloads/IDT/20091130/10\\_Class\\_superv.pdf](http://tlclab.unipv.it/downloads/IDT/20091130/10_Class_superv.pdf))

## CLASSIFICAZIONE A MINIMA DISTANZA

Vengono calcolate le distanze, solitamente euclidee, di un pixel dai centri dei vari cluster; il pixel sconosciuto viene assegnato alla classe del centro da cui il pixel ha la distanza più piccola.

Uno dei difetti di questo classificatore è che anche pixel che hanno una distanza notevole dal centro di un cluster possono essere assegnati a quel centro. Tale problema può essere superato definendo un valore di soglia ovvero una distanza massima al di sopra della quale non è possibile classificare il pixel incognito. Un ulteriore svantaggio di questo classificatore è che esso non tiene conto della variabilità delle classi; alcune classi sono piccole e dense mentre altre sono grandi e disperse. Il classificatore a Massima Verosimiglianza tiene, invece, conto di tale caratteristica.

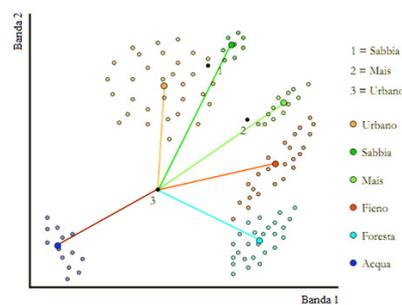


Figura 57 Classificazione a Minima Distanza

(Fonte: [http://tlclab.unipv.it/downloads/IDT/20091130/10\\_Class\\_superv.pdf](http://tlclab.unipv.it/downloads/IDT/20091130/10_Class_superv.pdf))

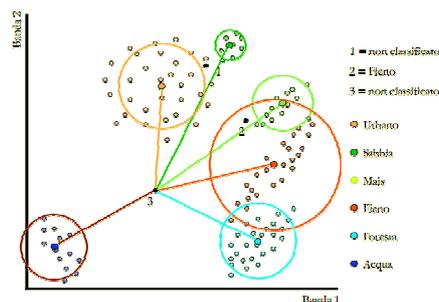


Figura 58 Classificazione a Minima Distanza con soglia

(Fonte: [http://tlclab.unipv.it/downloads/IDT/20091130/10\\_Class\\_superv.pdf](http://tlclab.unipv.it/downloads/IDT/20091130/10_Class_superv.pdf))

## CLASSIFICAZIONE A MASSIMA VEROSIMIGLIANZA

Si ipotizza che la distribuzione della nuvola di punti generata dai *training site* di ciascuna classe sia di tipo gaussiano e quindi sia descrivibile con valore medio e matrice di covarianza dei pixel campione; dai *training site* si ricavano la posizione del pixel medio, la varianza e la covarianza di ogni

cluster; tali parametri stabiliscono forma e posizione della nuvola di punti relativa alla data classe nello spazio delle caratteristiche. Dai *training site* si ricavano, anche, le funzioni di probabilità per ciascuna classe che derivano dall'andamento della quantità di pixel presenti in una data classe all'allontanarsi del punto medio della classe stessa. In sostanza si definiscono delle curve concentriche di equiprobabilità che si allontanano dal punto medio della classe: ellissi progressivamente più grandi circondanti il centro rappresentano i contorni di probabilità di appartenenza ad una classe con probabilità che diminuisce via via che ci si allontana dal centro. Quindi, con questo metodo di assegnazione, non si considera soltanto il centro dei cluster, ma si tiene conto anche della loro forma, dimensione e orientamento.

Il classificatore calcola la probabilità di appartenenza di un pixel ad una certa classe: il pixel viene assegnato alla classe più verosimile ovvero con alto valore di probabilità. L'utente può definire una probabilità di soglia ovvero un valore di probabilità minima al di sotto del quale il pixel incognito rimane non classificato.

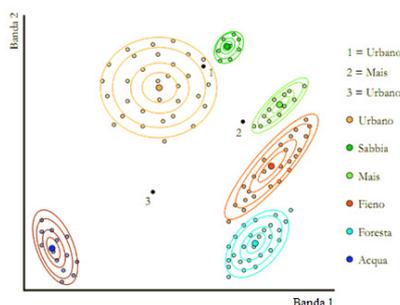


Figura 59 Classificazione a Massima Verosimiglianza  
(Fonte: [http://tclab.unipv.it/downloads/IDT/20091130/10\\_Class\\_superv.pdf](http://tclab.unipv.it/downloads/IDT/20091130/10_Class_superv.pdf))

### CLASSIFICAZIONE CON SPECTRAL ANGLE MAPPER (SAM)

Si basa sull'analisi di similarità tra uno spettro di riferimento, definito per ciascuna classe, e gli spettri associati ai pixel dell'immagine; tale somiglianza spettrale viene determinata calcolando l'angolo tra gli spettri e trattando quest'ultimi come vettori in uno spazio con dimensione pari al numero delle bande spettrali. Gli spettri di riferimento sono ottenuti dalla media degli spettri forniti dai *training site* di ogni classe.

Il SAM assegna il pixel alla classe rispetto alla quale presenta un minor angolo: angoli piccoli corrispondono a punti più vicini allo spettro di riferimento.

L'utente può definire un angolo massimo per cui i pixel che superano tale soglia non vengono classificati.

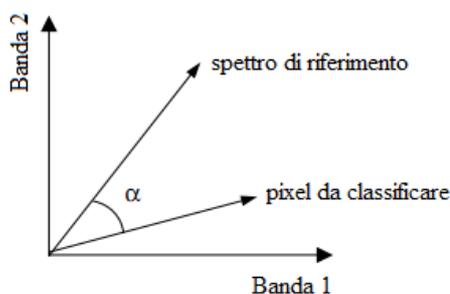


Figura 60 Classificazione con SAM

(Fonte: [http://tlclab.unipv.it/downloads/IDT/20091130/10\\_Class\\_superv.pdf](http://tlclab.unipv.it/downloads/IDT/20091130/10_Class_superv.pdf))

### 3.2 VALIDAZIONE

Le immagini classificate, prima di essere consegnate all'utente utilizzatore, devono essere sottoposte ad una rigorosa valutazione statistica di accuratezza al fine di conoscere l'affidabilità del risultato ottenuto ed individuare gli eventuali errori presenti. Per accuratezza di una mappa tematica si intende la misura dell'accordo tra la mappa tematica ottenuta dalla classificazione e i dati di verità a terra noti.

Gli errori che possono verificarsi in un processo di classificazione sono fondamentalmente due:

- Errore di commissione o inclusione: pixel di classi diverse vengono assegnati alla stessa classe;
- Errore di omissione: pixel appartenenti a una determinata classe sono omessi dal risultato.

La valutazione dell'accuratezza viene effettuata confrontando l'immagine classificata con un'immagine che viene assunta come verità a terra. Per effettuare il confronto viene generata la matrice di errore o matrice di confusione: matrice quadrata  $q \times q$  dove  $q$  è il numero delle classi; lungo le righe si hanno i dati della classificazione e lungo le colonne sono riportati i dati di riferimento. I valori sulla diagonale principale

rappresentano gli elementi classificati correttamente mentre gli elementi esterni alla diagonale principale rappresentano gli errori di classificazione.

		dati di riferimento (colonne)				Totali per classe nella mappa
		classi	1	2	...	
dati di classificazione (righe)	1	$p_{11}$	$p_{12}$	...	$p_{1q}$	$p_{1+}$
	2	$p_{21}$	$p_{22}$	...	$p_{2q}$	$p_{2+}$
	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
	q	$p_{q1}$	$p_{q2}$	...	$p_{qq}$	$p_{q+}$
Totali per classe nel riferimento		$p_{+1}$	$p_{+2}$	...	$p_{+q}$	

Figura 61 Matrice di confusione

La matrice di confusione è utilizzata come punto di partenza per ricavare una serie di parametri che esprimono la qualità della classificazione. Le misure di accuratezza sono:

- Accuratezza globale (*Overall Accuracy*): rapporto tra il numero di pixel correttamente classificati (tutti i pixel  $p_{kk}$  nella diagonale) e il numero totale di pixel nella matrice; esprime la probabilità che un pixel estratto a sorte sia correttamente classificato.

$$AG = \frac{\sum_{k=1}^q p_{kk}}{n}$$

- Accuratezza Utente (*User Accuracy*): rapporto tra il numero di pixel correttamente classificati che appartengono a una certa classe ( $p_{ii}$ ) e il numero totale dei pixel assegnati alla medesima classe ( $p_{i+}$ ); rappresenta la probabilità condizionale che ha un punto, estratto a sorte e appartenente alla classe  $i$ , di essere correttamente classificato.

$$AU = \frac{p_{ii}}{p_{i+}}$$

- Accuratezza Produttore (*Producer Accuracy*): rapporto tra la somma dei pixel assegnati correttamente alla classe  $j$  ( $p_{jj}$ ) e il numero totale dei pixel della classe  $j$  nell'immagine di riferimento ( $p_{+j}$ ); esprime la probabilità condizionale che ha un punto, estratto a sorte e appartenente alla classe  $j$  nell'immagine di riferimento, di essere stato classificato correttamente nella mappa tematica.

$$AP = \frac{p_{jj}}{p_{+j}}$$

- Errore di Commissione (*Commission Error*): rappresenta la probabilità condizionale che ha un pixel, estratto a sorte e appartenente alla classe  $i$  nell'immagine classificata, di non essere stato correttamente classificato.

$$EC = 1 - AU = \frac{\sum_{k=1}^q p_{ik}}{p_{i+}} \text{ relativo alla classe } i (k \neq i)$$

- Errore di omissione (*Omission Error*): rappresenta la probabilità condizionale che ha un pixel, estratto a sorte e appartenente alla classe  $j$  nell'immagine di riferimento, di non essere stato correttamente classificato nella mappa tematica.

$$EO = 1 - AP = \frac{\sum_{k=1}^q p_{kj}}{p_{+j}} \text{ relativo alla classe } j (k \neq j)$$

- Coefficiente di accordo kappa (*kappa-Coefficient*): permette di confrontare classificazioni prodotte da immagini diverse; si assume che la classificazione automatica e quella di riferimento siano entrambe assegnazioni di classi indipendenti di eguale attendibilità; ciò che viene misurato è quanto bene esse concordino fra loro.

Rispetto all'Accuratezza globale, l'indice kappa prende in considerazione la "concordanza casuale" e la corregge. Il termine "concordanza casuale" rappresenta in questo contesto la probabilità che la classificazione automatica e quella di riferimento concordino per puro caso. Si può anche dire che l'indice kappa esprime la riduzione proporzionale nell'errore generato dal processo di classificazione rispetto all'errore di una classificazione completamente casuale.

L'indice kappa può assumere valori compresi tra 0 e 1 dove 1 rappresenta il massimo accordo tra i dati di riferimento e la mappa prodotta dalla classificazione: valori prossimi a 0.4 indicano una classificazione scadente, valori intorno a 0.75 sono indice di una buona classificazione (il processo di classificazione ha evitato il

75% degli errori che sarebbero stati commessi con una classificazione del tutto casuale).

$$k = \frac{n \cdot \sum_{k=1}^q p_{kk} - \sum_{k=1}^q (p_{k+} \cdot p_{+k})}{n^2 - \sum_{k=1}^q (p_{k+} \cdot p_{+k})}$$

## **CAPITOLO 4 - CASO DI STUDIO**

Di seguito, dopo un inquadramento generale sulle caratteristiche del territorio in esame, vengono descritti il materiale e le tecniche di elaborazione di immagini utilizzati per la realizzazione di mappe di uso e copertura del suolo della città di Dhaka (Bangladesh) nel periodo 2000-2009. L'obiettivo è quello di studiare la dinamica di sviluppo dell'area urbana e di identificare le zone inondabili per una corretta gestione del rischio alluvione.

Il caso di studio nasce da una proposta dell'associazione ITHACA (*Information Technology for Humanitarian Assistance, Cooperation and Action*) che realizza prodotti cartografici per la pianificazione degli interventi in caso di eventi calamitosi come terremoti, cicloni e alluvioni.

### **4.1 ITHACA**

ITHACA (*Information Technology for Humanitarian Assistance, Cooperation and Action*), che vede come soci fondatori il Politecnico di Torino e il SiTI (*Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali per l'Innovazione*), ha lo scopo di condurre attività operative e di ricerca nel settore della geomatica per l'analisi, la valutazione e la mitigazione dei danni nei casi di emergenze ambientali.

ITHACA fornisce supporto alle attività del WFP (*World Food Programme*), agenzia operativa delle Nazioni Unite che si occupa della distribuzione di aiuti alimentari nelle situazioni di emergenza, sia nella fase di previsione (*Early Warning*) sia in quella di valutazione delle conseguenze di un evento catastrofico (*Early Impact*). In particolare, l'attività svolta da ITHACA, in collaborazione con l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), è quella di produrre, in tempi rapidi (poche ore dalla disponibilità del dato primario), informazioni georeferenziate a partire da immagini satellitari. Tali immagini sono sia di tipo multispettrale sia immagini radar della costellazione satellitare italiana COSMO-SkyMed, che consentono un'analisi di dettaglio anche quando la copertura nuvolosa presente sulle aree colpite rende inutilizzabili i dati ottici ad alta risoluzione.

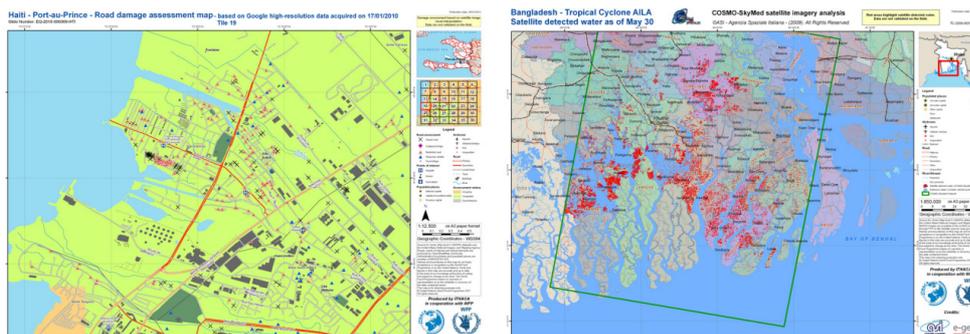


Figura 62 Esempio di cartografia prodotta da Ithaca: Port au Prince (Haiti) - strade danneggiate dal terremoto del 2010 e Bangladesh – allagamenti dovuti al ciclone Aila nel 2009  
(Fonte: <http://www.ithacaweb.org/>)

#### 4.1.1 In caso di allerta metereologiche

In seguito alla diramazione di allerta meteorologiche da cui possono derivare eventi alluvionali, l'attività pre-evento di ITHACA consiste nella raccolta di dati satellitari di archivio sulla zona di interesse per una visione d'insieme delle aree potenzialmente a rischio e nell'elaborare carte a piccola scala che indichino le aree alluvionabili. Ciò consente di indicare le aree su cui focalizzare indagini più dettagliate.

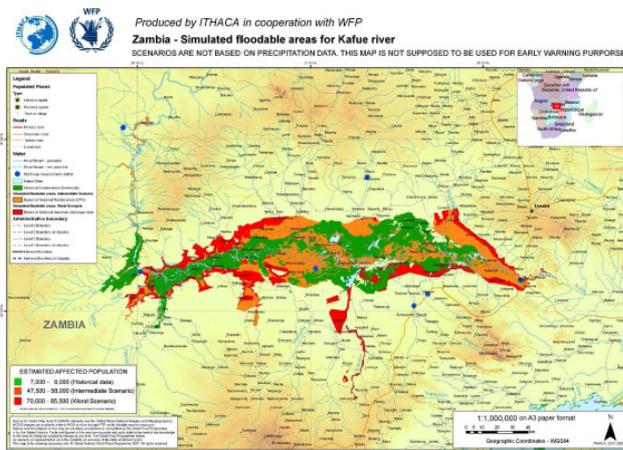


Figura 63 Esempio di cartografia di aree alluvionabili (definizione di diversi scenari)  
(Fonte: <http://www.ithacaweb.org/>)

Nella fase post-evento ITHACA realizza cartografia relativa a:

- aree fisicamente sommerse d'acqua (aree alluvionate);
- aree interessate anche solo indirettamente dall'evento alluvionale (aree coinvolte);
- stima del numero di persone residenti nelle aree alluvionate e nelle aree coinvolte;
- danni alle infrastrutture.

I dati cartografici ottenuti sono resi disponibili al WFP, perché vengano inoltrati agli uffici locali .



Figura 64 Esempio di cartografia delle aree alluvionate  
(Fonte: <http://www.ithacaweb.org/>)

## 4.2 DHAKA (BANGLADESH)

Il Bangladesh si estende su 144.000 km<sup>2</sup> e confina su tutti i lati con l'India, ad eccezione di un piccolo tratto, nell'estremo sud-est, in cui il paese tocca il Myanmar. A sud si affaccia sulla costa alluvionale del Golfo del Bengala.

Il paese coincide sostanzialmente con il basso corso del Gange e del Brahmaputra che, nella parte centrale del paese, si fondono in un unico fiume (il Padma) con numerose ramificazioni. Il terreno alluvionale depositato da questi fiumi ha creato alcune delle più fertili pianure in tutto il mondo.

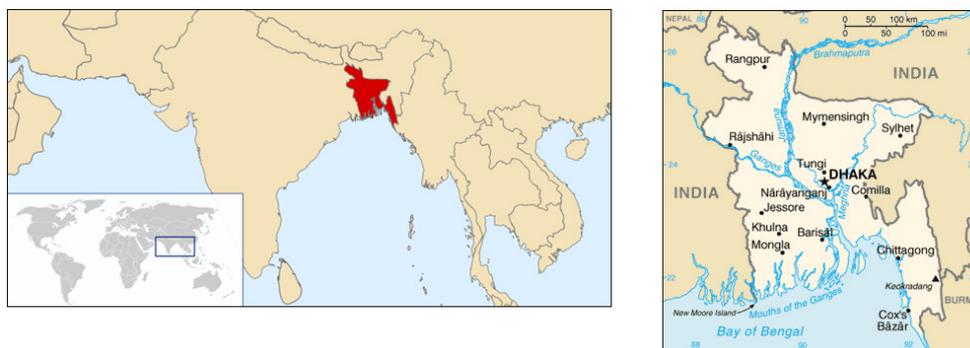


Figura 65 Localizzazione del Bangladesh e della capitale Dhaka  
(Fonte: <http://it.wikipedia.org/wiki/>)

La maggior parte del paese si trova a meno di 12 m s.l.m., il che lo rende estremamente soggetto a inondazioni dovute a fiumi in piena o all'alta

marea. Le uniche zone leggermente diverse dal resto del paese, si trovano negli angoli nord-orientale e sud-orientale, dove sorgono delle modeste colline che raggiungono un'altezza media di 240 m e 600 m s.l.m. rispettivamente.

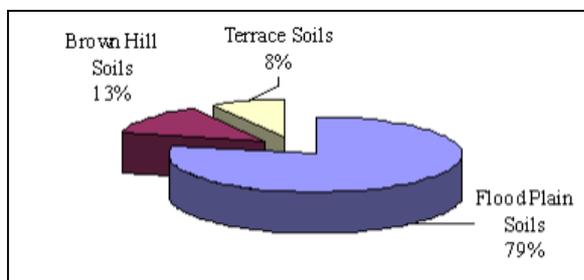


Figura 66 le 3 tipologie di suolo che caratterizzano il territorio del Bangladesh (Fonte: <http://www.fao.org>)

Posto a cavallo del tropico del Cancro, il Bangladesh presenta un clima tropicale monsonico caratterizzato da tre stagioni principali: la stagione umida o dei monsoni che va dalla fine di maggio all'inizio di ottobre e che fornisce la maggior parte delle precipitazioni che cadono sul paese; la stagione fredda che va dalla metà di ottobre alla fine di febbraio e la stagione calda (conosciuta in Bangladesh come la “stagione delle piccole piogge”) che va dalla metà di marzo alla metà di maggio. Esiste anche una stagione dei cicloni (da maggio a giugno e da ottobre a novembre). Quasi ogni anno si verificano calamità naturali, quali inondazioni, cicloni tropicali, tornado, mareggiate, che si combinano con i danni provocati dalla deforestazione, dal degrado del suolo e dall'erosione.

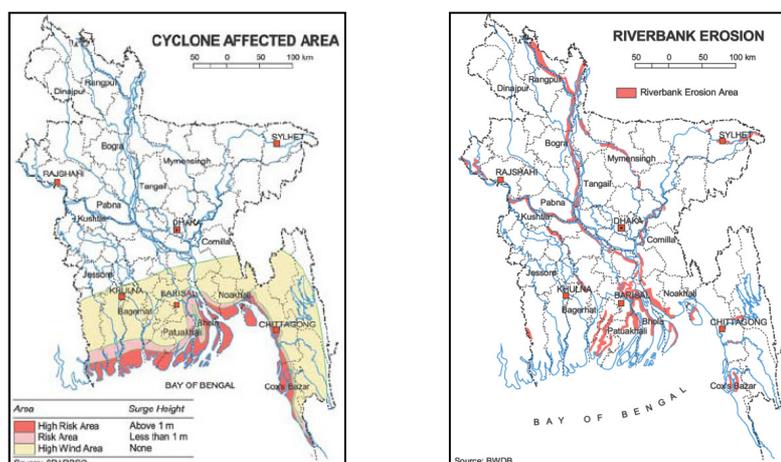


Figura 67 Zone a rischio ciclone e aree soggette a erosione (Fonte: <http://www.sparrso.gov.bd/> e <http://www.bwdb.gov.bd/>)

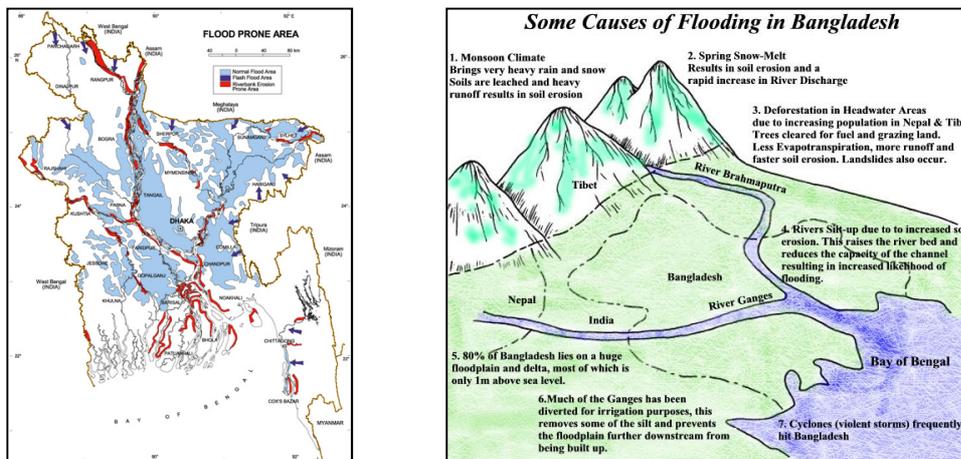


Figura 68 Aree soggette ad alluvione e cause di inondazione  
 (Fonte: <http://bdshots.com/d/10967-1/Flood+Prone+Area.gif> e <http://freshclick.wordpress.com/2009/03/27/causes-of-the-flooding-in-bangladesh/>) 2009

L'economia è ancora prevalentemente primaria e si basa sull'agricoltura e la pesca: la produzione agricola domina il prodotto nazionale impiegando più della metà della forza lavoro; in particolare, il 43,6% della forza lavoro si occupa della coltivazione del riso (BBS, 2009) che copre circa l'82% della superficie agricola totale (BBS, 2009). Vengono coltivati anche juta, tè, canna da zucchero, frumento, manghi, noci di cocco, ananas, e semi oleosi.

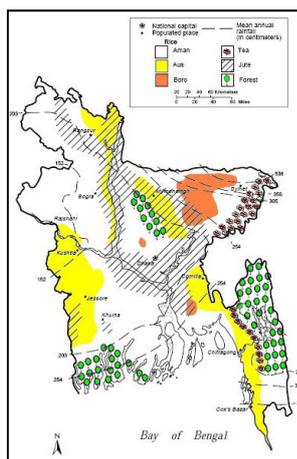


Figura 69 Aree dove si coltivano i principali prodotti agricoli  
 (Fonte: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:BD\\_Agriculture\\_Map.JPG](http://en.wikipedia.org/wiki/File:BD_Agriculture_Map.JPG))

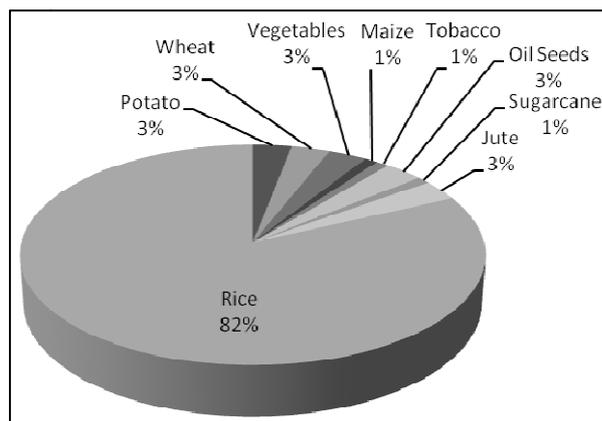


Figura 70 Distribuzione delle terre per le differenti colture agricole  
 (Fonte: <http://www.thedailystar.net/suppliments/2011/anniversary/part4/pg13.htm>)

L'attuale popolazione del Bangladesh è stimata attorno ai 156 milioni di persone (World Factbook della CIA). È da sottolineare la notevole crescita della popolazione urbana degli ultimi decenni: si è passati da 14,1 milioni nel 1981 a 22,5 milioni nel 1991 a 31,1 milioni nel 2001 (BBS, 2001) fino a 35 milioni nel 2005 (CUS, NIPORT, e misurazione, 2006). Tale aumento ha portato a una rapida urbanizzazione e di conseguenza alla trasformazione delle aree rurali in aree sviluppate: è stato stimato che più di 809 km<sup>2</sup> di terreno agricolo viene convertito in città, strade e infrastrutture ogni anno (BBS, 1996). La diminuzione di terreni coltivati e quindi di attività agricole, contribuisce alla scarsità di cibo e a mettere a repentaglio l'economia.

Fonte	Anno	Popolazione (milioni)
Censimento Nazionale	1991	112
Censimento Nazionale	2001	129
Fondo di Popolazione delle Nazioni Unite	2003	150
Nazioni Unite Dipartimento degli Affari economici e sociale	2005	142
Dipartimento di Stato degli Stati Uniti	2005	144
Population Reference Bureau	2005	144
World Factbook della CIA	2006	147
Fondo di Popolazione delle Nazioni Unite	2006	144
World Factbook della CIA	2007	150
Delle Nazioni Unite	2007	159
Banca Mondiale	2008	160
World Factbook della CIA	2010	156

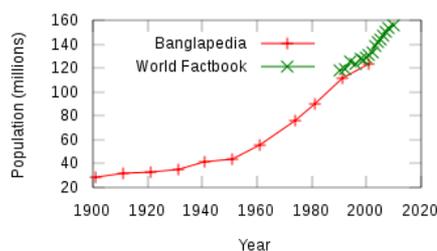


Figura 71 Stime della popolazione del Bangladesh (1991-2010) ed evoluzione demografica del Bangladesh (1900-2010)  
 (Fonte: <http://www.banglapedia.org/>)

Il territorio del Bangladesh è suddiviso in 7 divisioni amministrative: Barisal, Chittagong, Dhaka, Khulna, Rajshahi, Sylhet e Rangpur. Le divisioni contengono 64 distretti (*Zila*) e ciascun distretto è ulteriormente frazionato in sottodistretti (*Upazila* o *Thana*).

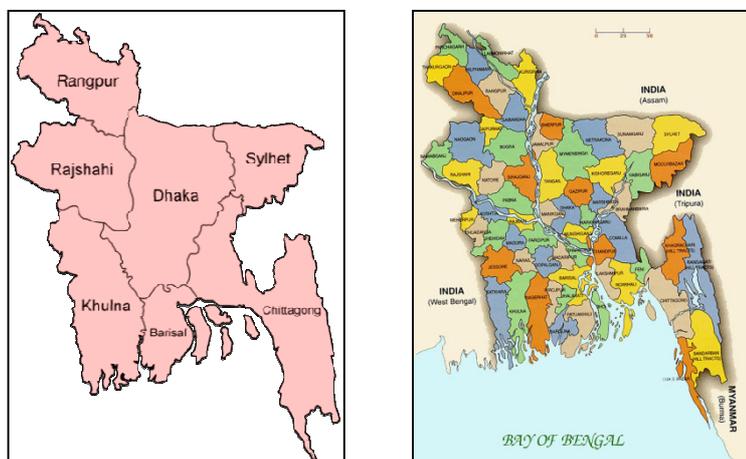


Figura 72 Le 7 divisioni amministrative e i 64 distretti del Bangladesh  
(Fonte: [http://it.wikipedia.org/wiki/Template:Divisioni\\_e\\_Distretti\\_del\\_Bangladesh](http://it.wikipedia.org/wiki/Template:Divisioni_e_Distretti_del_Bangladesh))

Dhaka è la capitale e la città più popolosa del Bangladesh nonché il centro industriale, commerciale e amministrativo della nazione.

La città si sviluppa su un terrazzo alluvionale, conosciuto come la pianura del Modhupur, regione con la più grande coltivazione di iuta al mondo; è circondata da quattro sistemi fluviali maggiori: il Buriganga, Turag, Tongi e Balu. Questi fiumi sono principalmente alimentati da precipitazioni locali ma ricevono anche il deflusso di fiumi notevolmente più grandi come Gange, Meghna e Brahmaputra.

La città è caratterizzata da un distinto periodo monsonico: circa l'87% delle precipitazioni medie annue (2.121 mm) avviene tra maggio e ottobre. Il verificarsi di piogge monsoniche, in combinazione con il deflusso delle piene dei fiumi che circondano la città, rendono Dhaka pericolosamente soggetta a inondazioni. Inoltre l'elevazione della città varia da 0,5 m per 12 m s.l.m., con il 70% della superficie totale entro 0,5 a 5 m s.l.m, per cui queste terre basse, fungono da bacino di detenzione temporanea per le acque di inondazione.

La città ha vissuto negli ultimi decenni un'espansione urbana tra le più elevate al mondo; in particolare, l'esplosione demografica causata in gran

parte dalla migrazione rurale-urbana ha contribuito in maniera significativa a tale crescita. Secondo il Programma delle Nazioni Unite per gli insediamenti umani, la capitale del Bangladesh è la megalopoli che cresce più rapidamente al mondo e si stima che nel 2025 la città avrà più di 20 milioni di abitanti.

L'assenza di un'adeguata politica dell'uso del suolo e di informazioni affidabili sulle attuali pratiche di sfruttamento del terreno hanno contribuito a un'espansione urbana tentacolare e incontrollata con conseguenti problemi ambientali diffusi in tutta la città:

- incremento delle superfici impermeabili e ricorrenti episodi di allagamento dovuti all'aumento del ristagno idrico e al peggioramento delle possibilità di ridurre i flussi alluvionali durante la stagione umida;
- invasione di zone a rischio alluvione e distruzione di corpi idrici;
- estesa povertà urbana e crescita degli *slum*;
- cattiva gestione delle risorse territoriali.



Figura 73 Una delle mega espansioni della città di Dhaka (2004-2010)  
(Fonte: Google Earth)



Figura 74 Navi e condotte che trasportano sabbia o terreno per riempire zone basse o corsi d'acqua  
(Fonte: <http://www.panoramio.com>)

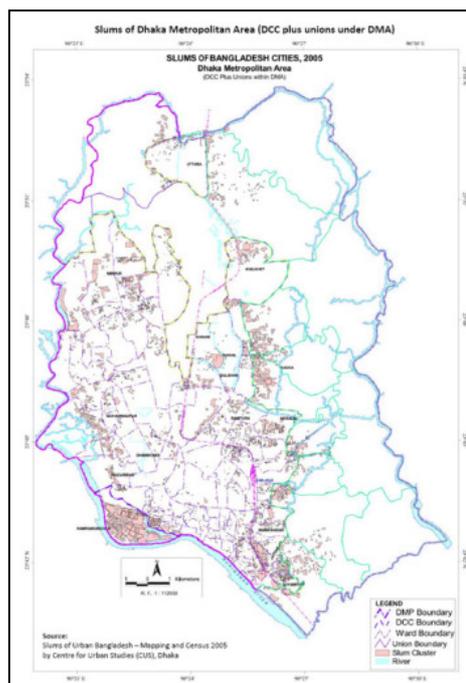


Figura 75 Ubicazione degli slums nell'area di Dhaka (2005)  
(Fonte: CUS – Centre for Urban Studies, Dhaka)

Le sopracitate problematiche sono state analizzate, in questo elaborato, studiando i cambiamenti di destinazione d'uso del suolo nella zona di Dhaka.

#### 4.3 MATERIALE

Per lo studio della proliferazione urbana di Dhaka e dei conseguenti cambiamenti nella destinazione d'uso del suolo, sono state utilizzate 4 immagini Landsat relative agli anni 1989, 2000, 2002 e 2009. Al fine di effettuare un confronto corretto tra le immagini e data la forte stagionalità che caratterizza il territorio indagato, si è cercato di rintracciare immagini di uno stesso periodo dell'anno; in particolare, le immagini sopracitate riguardano i mesi di ottobre e novembre in cui si risentono maggiormente gli effetti collaterali delle piogge monsoniche.

Per individuare le aree che sistematicamente vengono inondate durante la stagione dei monsoni, l'immagine dell'ottobre del 2009, è stata confrontata con due immagini del 2010, rispettivamente di gennaio e febbraio, che fotografano il territorio a tre e quattro mesi di distanza dagli allagamenti.

Tabella 1 Caratteristiche delle immagini utilizzate

	1989	2000	2002	2009
<b>DATA DI ACQUISIZIONE</b>	4-11-1989	26-11-2000	31-10-2002	26-10-2009
<b>SATELLITE</b>	Landsat 5	Landsat 7	Landsat 7	Landsat 5
<b>SENSORE</b>	TM	ETM+	ETM+	TM
<b>PATH/ROW</b>	137/44	137/44	137/44	137/44
<b>DATUM</b>	WGS 84	WGS 84	WGS 84	WGS 84
<b>MAP PROJECTION</b>	UTM	UTM	UTM	UTM
<b>ZONA</b>	46 N	46 N	46 N	46 N
<b>PRODOTTO</b>	L1T	L1T	L1T	L1T
<b>RISOLUZ. GEOM. PANCROMATICO</b>	-	15 m	15 m	-
<b>RISOLUZ. GEOM. MULTISPETTRALE</b>	28,5 m	30 m	30 m	30 m

	2010	2010
<b>DATA DI ACQUISIZIONE</b>	30-01-2010	15-02-2010
<b>SATELLITE</b>	Landsat 5	Landsat 5
<b>SENSORE</b>	TM	TM
<b>PATH/ROW</b>	137/44	137/44
<b>DATUM</b>	WGS 84	WGS 84
<b>MAP PROJECTION</b>	UTM	UTM
<b>ZONA</b>	46 N	46 N
<b>PRODOTTO</b>	L1T	L1T
<b>RISOLUZ. GEOM. PANCROMATICO</b>	-	-
<b>RISOLUZ. GEOM. MULTISPETTRALE</b>	30 m	30 m

Le immagini sono state scaricate gratuitamente dai siti dell'USGS (U.S. Geological Survey) Glovis (<http://glovis.usgs.gov/>) e New Earth Explorer (<http://edcsns17.cr.usgs.gov/NewEarthExplorer/>).

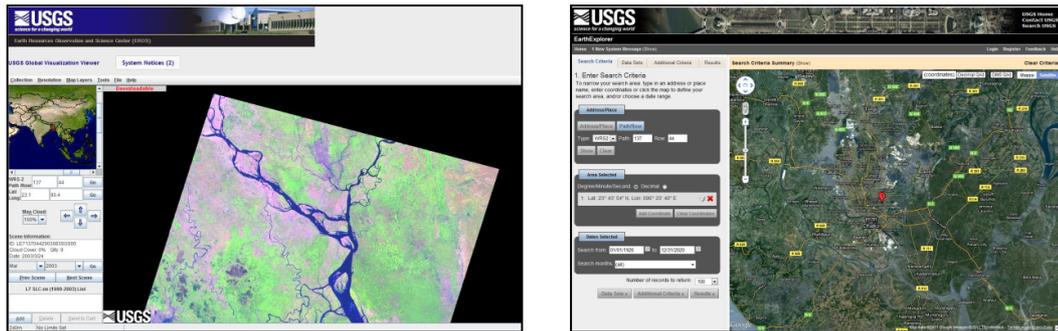


Figura 76 Interfaccia di Glovis e New Earth Explorer

Essendo prodotti di livello 1T, le immagini sono già state sottoposte a correzione radiometrica e geometrica; ad eccezione dell'immagine relativa al 1989, le immagini risultano coregistrate con l'immagine del 24-11-1999. Ithaca ha fornito una serie di dati in formato *shape file* relativamente al territorio del Bangladesh. In questa trattazione sono state utilizzate le informazioni riguardanti l'uso del suolo (*landuse.shp*), le suddivisioni amministrative (*thana490\_geoWGS84\_pop.shp*), e i fiumi principali (*majorriv.shp*). Suddetti dati, essendo riferiti al sistema geodetico locale Everest\_Adj\_1937, sono stati opportunamente riproiettati nel sistema geodetico WGS 84 al fine di renderli confrontabili con le informazioni derivanti dall'elaborazione delle immagini.

#### 4.4 SOFTWARE UTILIZZATO PER L'ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI

L'elaborazione delle immagini oggetto di studio è stata effettuata mediante il software ENVI. Esso è in grado di leggere e analizzare immagini e dati provenienti da sensori aerei e satellitari, inclusi dati pancromatici, multispettrali, iperspettrali, radar, termici, Lidar e può leggere oltre 70 formati, incluso HDF, GeoTIFF, NITF e COSMO-SkyMed. ENVI fornisce strumenti automatici che permettono di eseguire uno svariato numero di operazioni:

- Ortorettifica di immagini;
- Registrazione di due o più immagini ;
- Creazione di layer vettoriali;
- Identificazione di regioni di interesse (ROI);

- Creazione di modelli digitali del terreno (DEM);
- Pansharpning, mascheratura e mosaicizzazione;
- Subsetting spettrale e spaziale;
- Applicazione di filtri;
- Classificazione supervisionata e non supervisionata.

L'interfaccia grafica del programma è costituita da una barra di menù principale, una finestra per la gestione dei *file*, in cui, per ciascuno di essi, compaiono le bande disponibili e le informazioni di georeferenziazione (proiezione, dimensione del pixel a terra, datum, latitudine e longitudine geografiche e le coordinate della mappa) e tre finestre che permettono di visualizzare l'immagine a diversa scala.

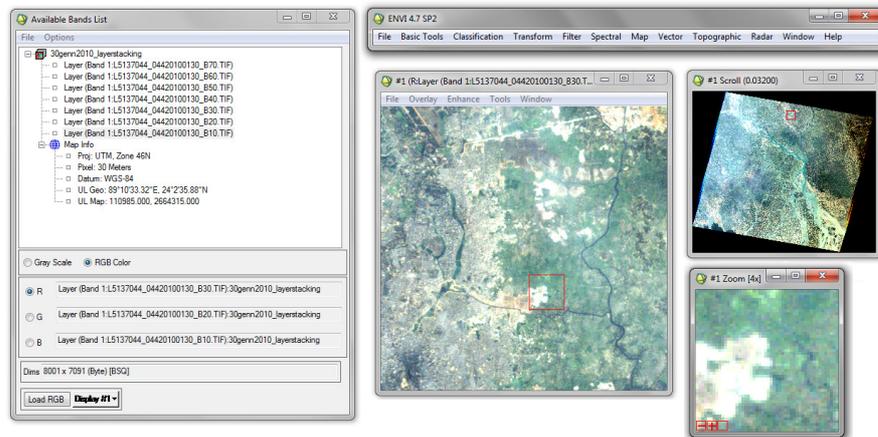


Figura 77 Interfaccia del programma ENVI

#### 4.5 PRE-ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI

Per i dati Landsat, ad ogni banda acquisita corrisponde un file d'immagine; quindi, per una maggiore rapidità di gestione delle immagini è stato creato, per ognuna di esse, un unico file contenente tutte le bande con risoluzione geometrica di 30 m. Tale procedura è stata effettuata mediante il comando di ENVI *Layer Stacking*. Nella finestra dedicata a tale funzione è possibile eseguire anche la *resampling* delle immagini ovvero si possono scegliere la dimensione del pixel e l'algoritmo di ricampionamento. Nello specifico, la suddetta funzione è stata utilizzata per ricampionare l'immagine del 1989; al fine di renderla confrontabile con le altre immagini Landsat, si è passati da una dimensione del pixel di 28,5 m x 28,5 m ad una di 30 m.

La superficie coperta da ciascuna immagine Landsat è circa 175 km Nord-Sud x 185 km Est-Ovest per cui è stato effettuato un subset delle stesse per selezionare l'area di studio. Innanzitutto è stato creato un *vector layer* per circoscrivere il territorio analizzato ed esso è stato utilizzato per il taglio di tutte le immagini. Le coordinate dell'area sono 23°54'7.14"N, 90°18'28.67"E (vertice superiore sinistro) e 23°39'38.04"N, 90°31'32.80"E (vertice inferiore destro) con una superficie di circa 590 km<sup>2</sup> (21,720 km x 27,150 km).

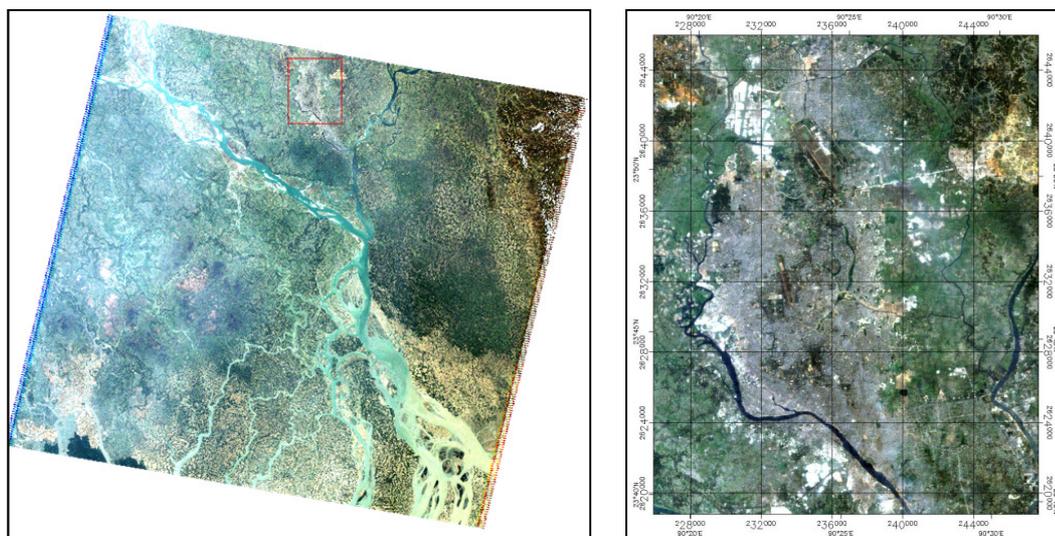


Figura 78 Immagine del 30-01-2010 (colori naturali) e relativo subset sull'area di studio

#### 4.6 LA CLASSIFICAZIONE DELLE IMMAGINI LANDSAT

Per ciascuna immagine è stata eseguita una classificazione di tipo supervisionato mediante l'algoritmo della massima verosimiglianza (par. 3.1.1 Classificazione supervisionata). Innanzitutto sono state determinate le classi di copertura da individuare nelle immagini analizzate e per ciascuna categoria sono stati scelti i pixel di addestramento.

La scelta delle classi d'informazione e l'identificazione dei *training site* sono il risultato di una fase preliminare di indagine dell'area di studio effettuata mediante l'interpretazione visiva delle immagini Landsat e la visualizzazione delle immagini satellitari del territorio presenti sul portale *Google Earth*. Relativamente alle immagini Landsat, è risultato particolarmente utile visualizzare le combinazioni tra bande 4-3-2 (*false colour standard*) e 7-4-2. La visualizzazione in falsi colori permette di

individuare in maniera più agevole le zone vegetate (il rosso intenso indica la presenza di vegetazione sana e chiome fogliari larghe; il rosso chiaro corrisponde a terreni erbosi o aree vegetate sparse) e le aree urbane (dal ciano all'azzurro). Il secondo stile di visualizzazione ha la particolarità di ridurre eventuali effetti legati alla diffusione atmosferica e mostra in verde brillante la vegetazione sana, in rosa le aree di suolo nudo, in blu acceso l'acqua in presenza di trasporto solido, in verde scuro tendente al nero l'acqua a contatto con la vegetazione e in varie tonalità di magenta le aree urbane.

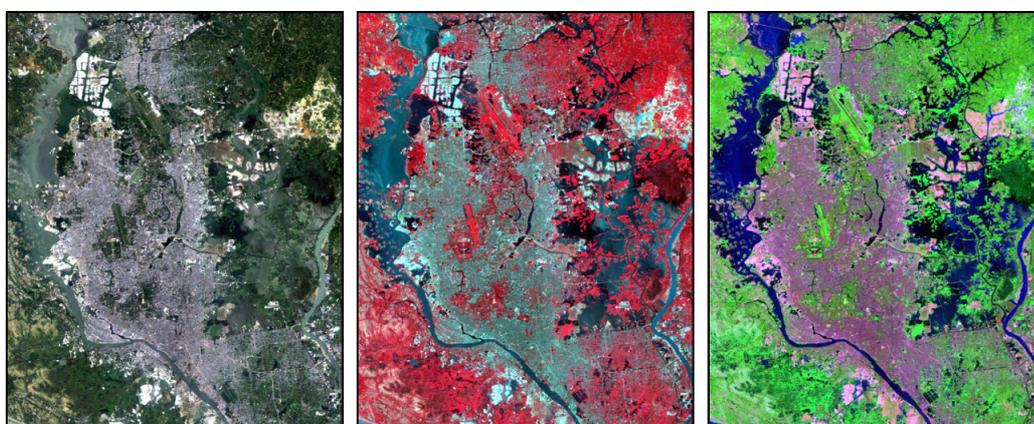


Figura 79 Area di studio (Dhaka, 2009) in colori naturali 3-2-1, in falsi colori 4-3-2 e nella combinazione 7-4-2

In generale, le classi d'informazione sono le stesse per tutte le immagini:

- *Build-up*: aree urbane, edifici, strade, parcheggi, aeroporti;
- *Bare soil*: zone di scavo, aree riempite con materiale di riporto, suolo nudo;
- *Vegetation*: aree coperte da densa vegetazione (foreste decidue, di palme, di conifere ecc.);
- *Cultivated land*: aree agricole, campi regolarmente arati e coltivati;
- *Water\_1*: acqua in presenza di solidi in sospensione e caratterizzata da trasporto di sedimenti come fiumi, torrenti e zone allagate;
- *Water\_2*: acqua a contatto con la vegetazione (canali d'irrigazione, laghi, zone vegetate allagate).

Nelle immagini del 2010, appositamente scelte perché acquisite in un periodo lontano delle piogge monsoniche, le due classi relative all'acqua sono state sostituite dalle classi *Water* ■, per indicare l'acqua presente in maniera permanente sul territorio (fiumi, canali d'irrigazione, laghi), e *Wetland/lowland* ■, per identificare zone basse, umide e aree periodicamente sommerse.

L'immagine del 2002 presenta una certa copertura nuvolosa per cui, oltre alle sopracitate classi, sono state create le categorie *Cloud* e *Shadow Cloud* ■ per permettere l'identificazione delle nuvole e delle ombre da esse generate sul territorio. Le nubi causano la perdita di informazione nelle zone in cui sono presenti. Nel caso specifico, queste interessano in particolar modo l'area urbana per cui sarebbe difficile utilizzare l'immagine per il successivo studio sullo sviluppo dell'urbanizzato. Si è quindi cercato di risolvere il problema ottenendo l'urbano dalla classificazione di un'immagine dello stesso anno ma del mese di febbraio.

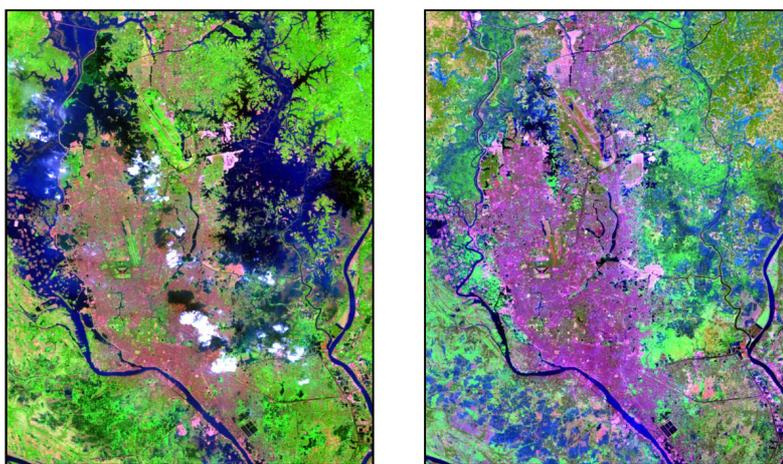


Figura 80 Immagine del 31 ottobre 2002 (7-4-2) con copertura nuvolosa e immagine del primo febbraio 2002 (7-4-2) utilizzata per l'estrazione dell'urbanizzato

I pixel di addestramento sono stati identificati direttamente sulle immagini sottoforma di poligoni, ovvero associando ad ogni classe una serie di regioni d'interesse (ROI) mediante l'omonimo comando di ENVI. Di seguito, a titolo d'esempio, si riportano le ROI relative all'immagine del 2009: la logica seguita è la stessa per ogni immagine.



ROI Name	Color	Pixels	Polygons
Build up	Red	753	18/753
Bare soil	Yellow	643	16/643
Vegetation	Green3	450	10/450
Cultivated land	Green1	688	11/688
Water_1	Blue	950	15/950
Water_2	Cyan1	602	16/602

Figura 81 ROI sull'immagine del 2009 (3-2-1) e interfaccia del *ROI Tool* di ENVI

Terminata la fase di addestramento è stato selezionato l'algoritmo di classificazione; nello specifico si è deciso di utilizzare il metodo della massima verosimiglianza. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

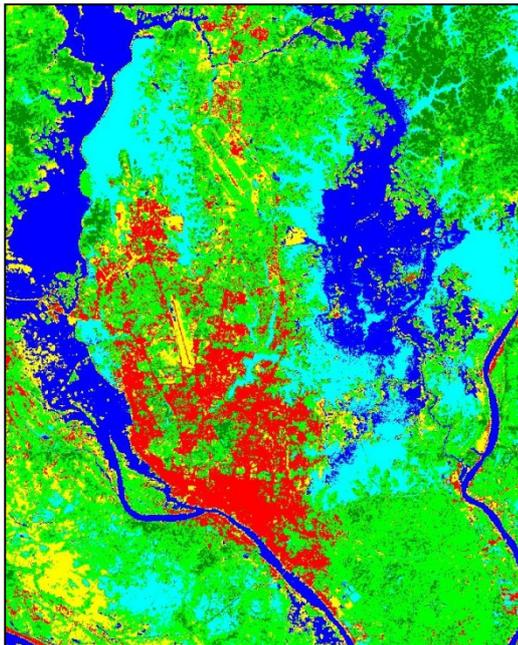


Figura 82 Dhaka 1989

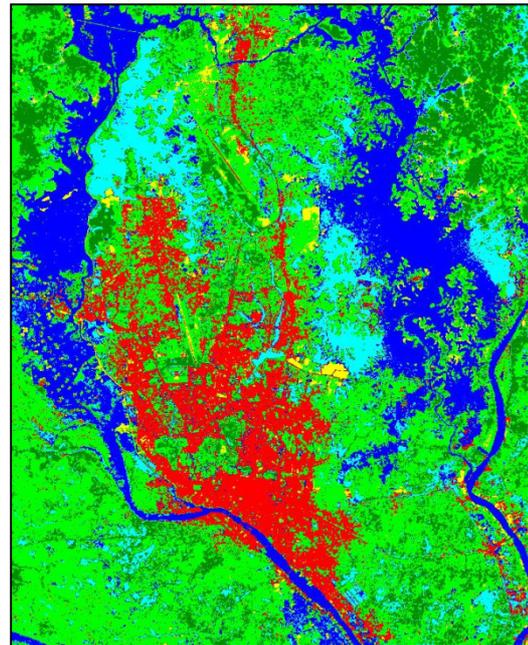


Figura 83 Dhaka 2000

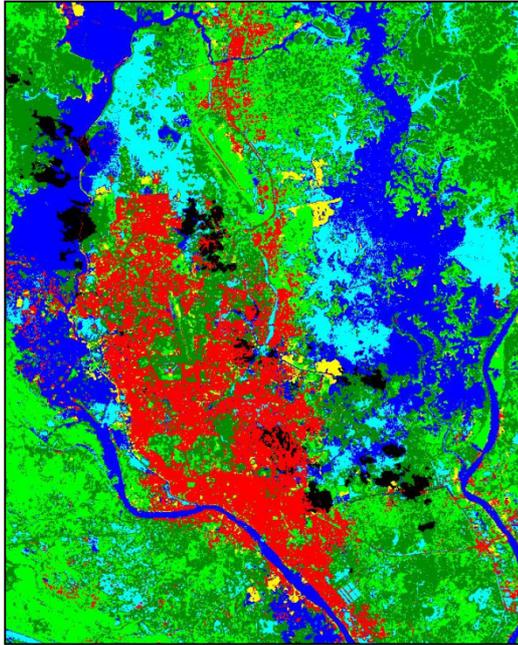


Figura 84 Dhaka 2002

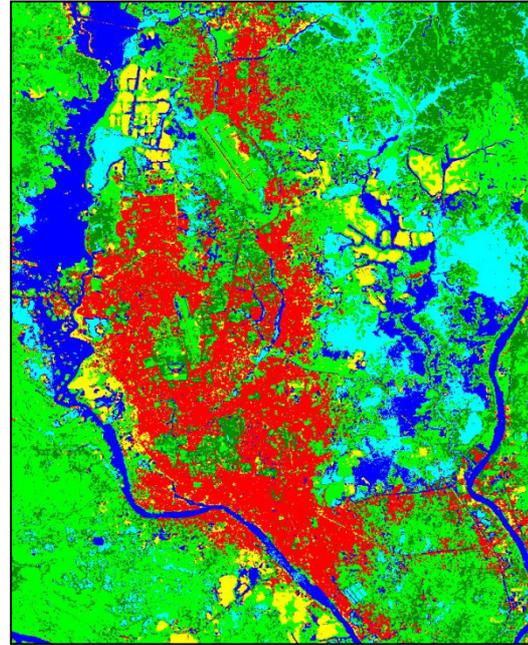


Figura 85 Dhaka 2009

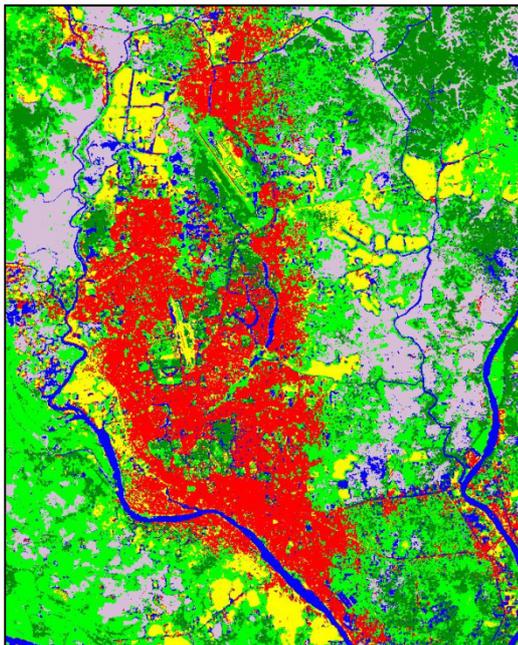


Figura 86 Dhaka gennaio 2010

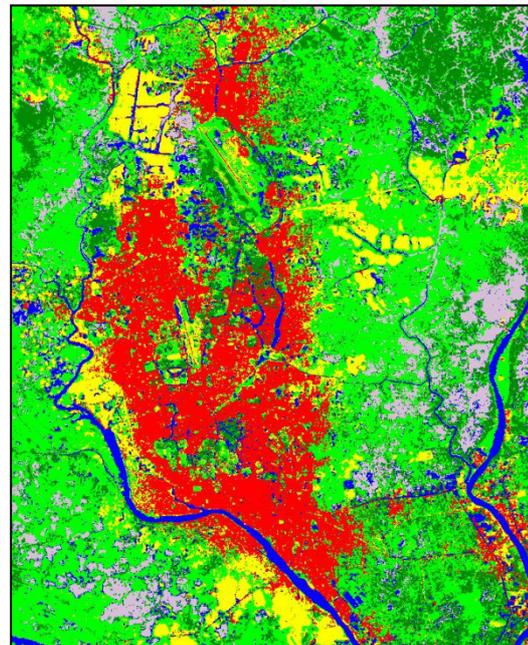


Figura 87 Dhaka febbraio 2010

#### 4.6.1 Validazione

La fase di validazione prevede il confronto tra le mappe risultanti dalla classificazione e punti di verità a terra (*ground truth*) al fine di valutare l'accuratezza della classificazione stessa (par. 3.2 VALIDAZIONE).

A causa della mancanza di dati di riferimento relativi al territorio indagato, la valutazione dell'accuratezza delle mappe sopra riportate, è stata

eseguita con l'ausilio di immagini dell'area di studio presenti su *Google Earth*: all'interno del portale, oltre a scegliere il livello di dettaglio con cui visualizzare l'immagine, è possibile, se presenti, visionare immagini di periodi differenti. Tali immagini hanno permesso di individuare una serie di punti di controllo sulle immagini Landsat di partenza. In particolare, per facilitare l'identificazione di tali punti, le immagini Landsat sono state esportate su *Google Earth* mediante lo strumento *Spear* di ENVI.

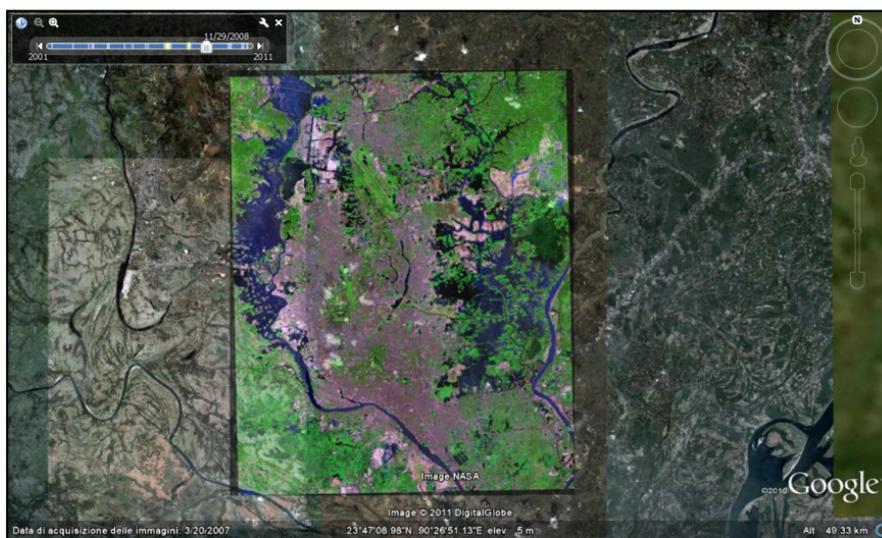


Figura 88 Immagine Landsat del 2009 (7-4-2) importata su Google Earth

Le immagini disponibili dell'area di Dhaka partono dal 2001, inoltre, soltanto dal 2004 coprono l'intera area studiata; di conseguenza, il supporto di *Google Earth* è stato utile solo per la validazione delle mappe relative al 2009 e al 2010. Per le mappe corrispondenti al 1989, al 2000 e al 2002 sono stata effettuate solo valutazioni qualitative, mediante un controllo visivo.

Per la validazione della mappa del 2009, non essendo disponibili immagini contemporanee alla Landsat di partenza (26 ottobre 2009), i punti di verità sono stati ricercati avvalendosi di un'immagine del 29 ottobre 2008. Per quanto riguarda la validazione delle mappe del 2010, i punti di riferimento sono stati scelti impiegando un'immagine del 25 gennaio 2010 e un'immagine del 27 febbraio 2010 ovvero del medesimo periodo delle immagine Landsat di partenza (30 gennaio 2010 e 15 febbraio 2010).

Per ogni classe informativa, sono stati identificati un centinaio di punti verità mediante la funzione *ROI Tool*; tali punti sono stati poi utilizzati per generare la matrice di confusione.

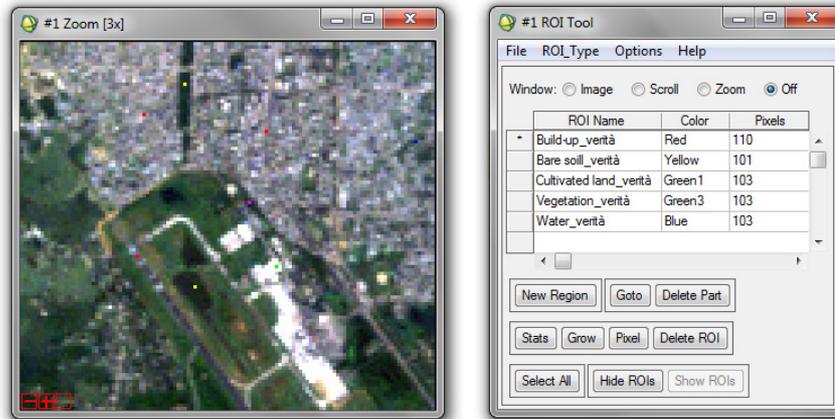


Figura 89 Punti di verità a terra sull'immagine del 2009

Si riportano di seguito le matrici di errore e i parametri di valutazione della qualità della classificazione prodotti dal software.

Overall Accuracy = (487/520) 93.6538%  
Kappa Coefficient = 0.9206

Class	Ground Truth (Pixels)					Total
	build-up_verità	Bare soil_verità	cultivated_la	Vegetation_verità	water_verità	
Unclassified	0	0	0	0	0	0
Build up	102	5	0	0	4	111
Bare soil	0	95	0	0	0	95
Cultivated la	3	1	101	6	2	113
Vegetation	2	0	2	96	4	104
water	3	0	0	1	93	97
<b>Total</b>	<b>110</b>	<b>101</b>	<b>103</b>	<b>103</b>	<b>103</b>	<b>520</b>

Class	Commission (Percent)		Omission (Percent)	
	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
Build up	8.11	7.27	9/111	8/110
Bare soil	0.00	5.94	0/95	6/101
Cultivated la	10.62	1.94	12/113	2/103
Vegetation	7.69	6.80	8/104	7/103
water	4.12	9.71	4/97	10/103

Class	Prod. Acc. (Percent)		User Acc. (Percent)	
	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
Build up	92.73	91.89	102/110	102/111
Bare soil	94.06	100.00	95/101	95/95
Cultivated la	98.06	89.38	101/103	101/113
Vegetation	93.20	92.31	96/103	96/104
water	90.29	95.88	93/103	93/97

Figura 90 Matrice di confusione e parametri di qualità della classificazione (2009)

Overall Accuracy = (577/621) 92.9147%  
 Kappa Coefficient = 0.9150

Class	Ground Truth (Pixels)							Total
	Build-up_veri	Bare soil_ver	Cultivated_la	Vegetation_ve	water_verità	wetland/lowla		
Unclassified	0	0	0	0	0	0	0	0
Build up	99	5	0	0	3	0	2	109
Bare soil	0	99	0	0	0	0	0	99
Cultivated la	3	0	99	4	0	0	1	107
Vegetation	2	0	3	100	3	0	0	108
water	3	0	0	1	89	1	8	101
wetland/lowla	0	0	0	0	6	91	97	101
Total	107	104	102	105	101	102	621	

Class	Commission (Percent)		Omission (Percent)		Commission (Pixels)		Omission (Pixels)	
	Build up	9.17	7.48	10/109	8/107			
Bare soil	0.00	4.81	0/99	5/104				
Cultivated la	7.48	2.94	8/107	3/102				
Vegetation	7.41	4.76	8/108	5/105				
water	11.88	11.88	12/101	12/101				
wetland/lowla	6.19	10.78	6/97	11/102				

Class	Prod. Acc. (Percent)		User Acc. (Percent)		Prod. Acc. (Pixels)		User Acc. (Pixels)	
	Build up	92.52	90.83	99/107	99/109			
Bare soil	95.19	100.00	99/104	99/99				
Cultivated la	97.06	92.52	99/102	99/107				
Vegetation	95.24	92.59	100/105	100/108				
water	88.12	88.12	89/101	89/101				
wetland/lowla	89.22	93.81	91/102	91/97				

Figura 91 Matrice di confusione e parametri di qualità della classificazione (gennaio 2010)

Overall Accuracy = (537/595) 90.2521%  
 Kappa Coefficient = 0.8830

Class	Ground Truth (Pixels)							Total
	Build-up_veri	Bare soil_ver	Cultivated_la	Vegetation_ve	water_verità	wetland/lowla		
Unclassified	0	0	0	0	0	0	0	0
Build up	89	7	0	0	4	2	2	102
Bare soil	0	95	0	0	0	0	0	95
Cultivated la	5	0	93	7	0	4	4	109
Vegetation	4	0	3	92	4	0	0	103
water	2	0	0	1	85	6	6	94
wetland/lowla	0	0	2	0	7	83	92	92
Total	100	102	98	100	100	95	595	

Class	Commission (Percent)		Omission (Percent)		Commission (Pixels)		Omission (Pixels)	
	Build up	12.75	11.00	13/102	11/100			
Bare soil	0.00	6.86	0/95	7/102				
Cultivated la	14.68	5.10	16/109	5/98				
Vegetation	10.68	8.00	11/103	8/100				
water	9.57	15.00	9/94	15/100				
wetland/lowla	9.78	12.63	9/92	12/95				

Class	Prod. Acc. (Percent)		User Acc. (Percent)		Prod. Acc. (Pixels)		User Acc. (Pixels)	
	Build up	89.00	87.25	89/100	89/102			
Bare soil	93.14	100.00	95/102	95/95				
Cultivated la	94.90	85.32	93/98	93/109				
Vegetation	92.00	89.32	92/100	92/103				
water	85.00	90.43	85/100	85/94				
wetland/lowla	87.37	90.22	83/95	83/92				

Figura 92 Matrice di confusione e parametri di qualità della classificazione (febbraio 2010)

#### 4.6.2 Considerazioni

Dalle matrici di confusione sopra riportate è possibile prendere spunto per fare alcune considerazioni sugli errori che affliggono la classificazione. Complessivamente si osserva una buona distinzione fra le classi; infatti l'accuratezza globale (*Overall Accuracy*) raggiunta è di 93,6% per la mappa del 2009, 92,9% per la mappa di gennaio 2010 e 90,2% per la mappa di febbraio 2010.

In generale, si possono rilevare alcuni errori legati alla risoluzione geometrica delle immagini (dimensione del pixel pari a 30 m).

Grandi centri urbani e agglomerati minori sono individuati in maniera corretta, mentre il classificatore ha più difficoltà a rilevare edifici isolati o singole case circondate da campi coltivati o da folta vegetazione. La stessa cosa accade in corrispondenza di ponti o strade ubicati in zone inondate: l'oggetto non "riempie" tutto il pixel, ovvero il pixel non è puro; il segnale è dunque una media dei segnali riflessi dalle diverse coperture presenti all'interno dello stesso pixel.

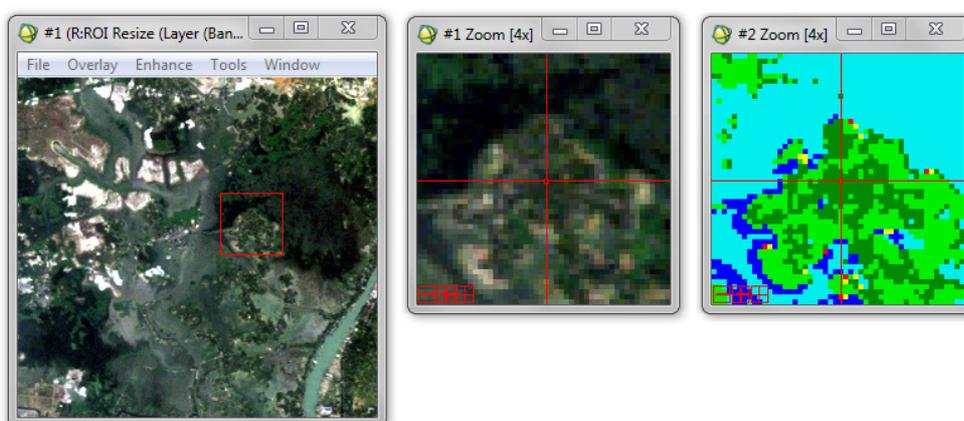


Figura 93 Case sparse in una zona alberata

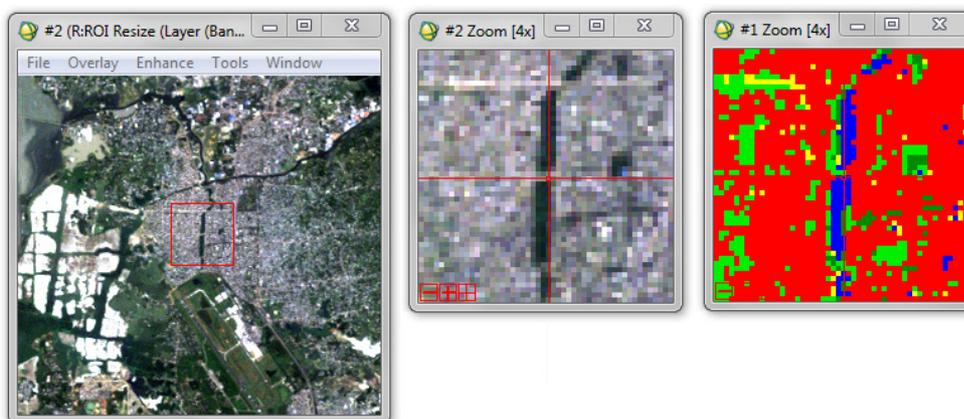


Figura 94 Ponte sul lago Uttera (2009)

Un discorso analogo si può fare anche per canali di dimensioni ridotte e piccoli specchi d'acqua; il classificatore riconosce correttamente grandi corpi idrici (fiumi, laghi, grandi canali di irrigazione e aree inondate) ma in corrispondenza di corsi d'acqua che attraversano zone coltivate, che

percorrono aree urbane o che sono circondati da vegetazione rigogliosa, il classificatore rileva solo in parte la presenza di acqua.

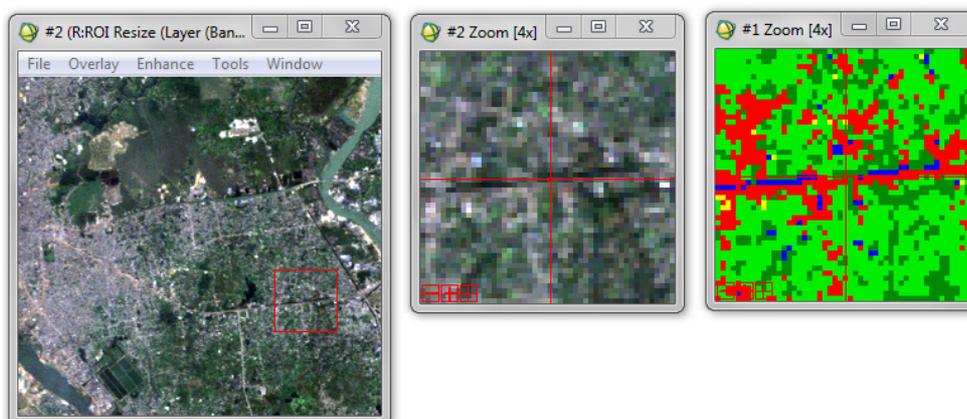


Figura 95 Canale (2009)

Si rileva una certa confusione nella distinzione tra le classi *Vegetation* e *Cultivated land* probabilmente dovuta a una risposta spettrale simile tra alberi o piante e certe piantagioni. Inoltre, come nei casi precedenti, alcuni errori dipendono dalla risoluzione spaziale delle immagini per cui vegetazione rada su campi coltivati, o viceversa, piccoli appezzamenti di terreno coltivato in zone densamente vegetate, possono non essere rilevati distintamente.

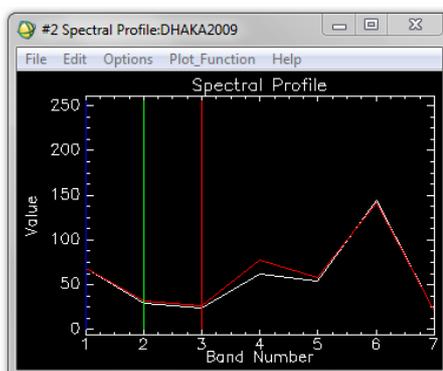


Figura 96 Firma spettrale di una zona alberata (bianco) e di un'area coltivata (rosso)

Nella mappa del 2010, un situazione simile, si riscontra nella distinzione tra le classi *Water* e *Wetland/lowland*. Ciò non è completamente errato poiché zone basse, contraddistinte da un elevato ristagno idrico, presentano caratteristiche simili a corpi idrici e, viceversa, specchi d'acqua minori, con livelli idrici ridotti, possono assumere le medesime proprietà di zone paludose.

Dalle matrici di confusione è possibile osservare alcuni errori relativi all'identificazione del suolo nudo (*Bare soil*). In particolare, si rileva una certa confusione con la classe *Build-up*. Andando a ricercare i punti dove il classificatore commette l'errore, ci si accorge che essi sono posizionati sulle rive di fiumi o in corrispondenza di isole artificiali, dove il materiale di riporto con cui sono realizzate si trova a contatto con l'acqua. In pratica, il problema si presenta dove c'è materiale sabbioso o argilloso saturo d'acqua e, in corrispondenza di tali punti, la firma spettrale risulta perfettamente sovrapposta a quella caratteristica di aree urbane.

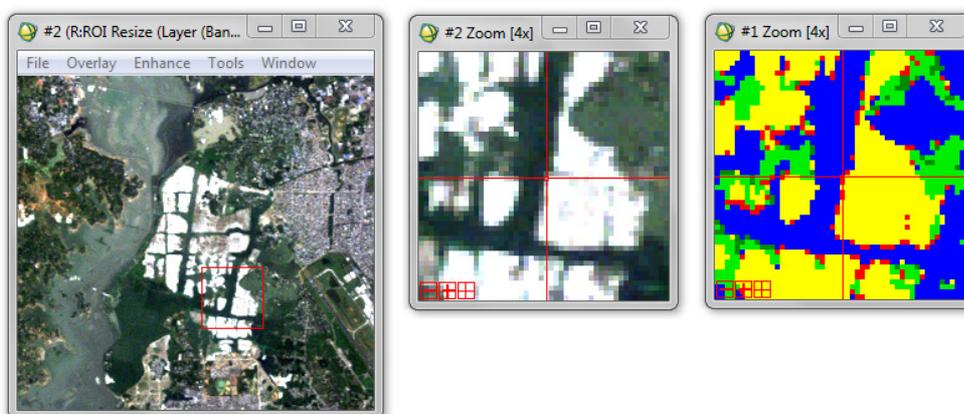


Figura 97 Zone riempite con materiale sabbioso di riporto

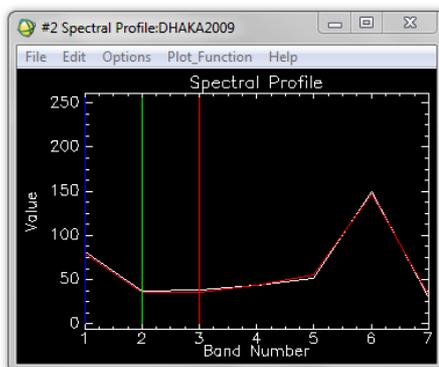


Figura 98 Confronto tra la firma spettrale del punto in Figura 97 (bianco) e un pixel all'interno dell'area urbana

Tale fenomeno può essere spiegato considerando che l'inerte, presente sulle sponde dei fiumi, e miscele di acqua, argilla e sabbia sono utilizzati rispettivamente per la realizzazione dei mattoni (sulle rive dei fiumi sono presenti numerosissime fabbriche di mattoni) e come materiale da costruzione.



Figura 99 Fabbriche di mattoni a Est di Dhaka  
(Fonte: Google Earth e <http://www.panoramio.com>)



Figura 100 Palazzine in mattoni tipiche del centro città e  
baracche di fango e paglia presenti nelle periferie della città  
(Fonte: <http://www.panoramio.com>)

Quindi, l'errore derivante dalla confusione tra le classi *Bare soil* e *Build-up* non dipende da una non corretta classificazione, ma dall'impossibilità di distinguere materiali simili che, in determinate condizioni, presentano risposte spettrali coincidenti.

Lo stesso problema si ripresenta per la classe *Water* (e anche *Wetland/lowland* nelle mappe del 2010), in corrispondenza di fondo sabbioso e bassi livelli d'acqua.

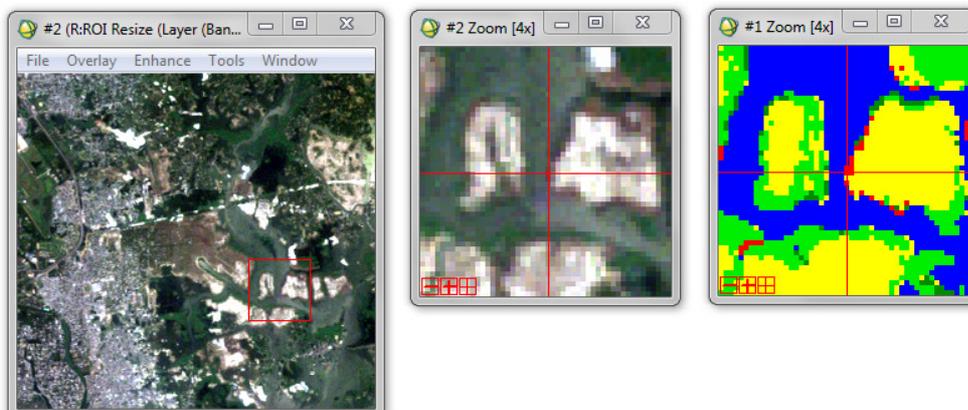


Figura 101 Fondale sabbioso con livelli d'acqua bassi

Anche se non è stato possibile effettuare una validazione rigorosa delle mappe relative agli anni precedenti il 2009, la problematica associata alle firme spettrali simili tra urbano e suolo nudo saturo d'acqua e urbano e fondo sabbioso in acque basse, è stata individuata anche in suddette mappe. Particolarmente afflitta dal problema è l'immagine del 4 novembre 1989.

Infatti, dove ci si aspetterebbe la presenza di campi coltivati, il classificatore individua zone urbanizzate. In questo caso, il problema si verifica non solo in porzioni di territorio situate in prossimità di corpi idrici, per cui la causa è ancora la presenza miscele di sabbia argilla e acqua (Figura 100, frecce nere), ma anche in zone più interne (Figura 100, frecce bianche).

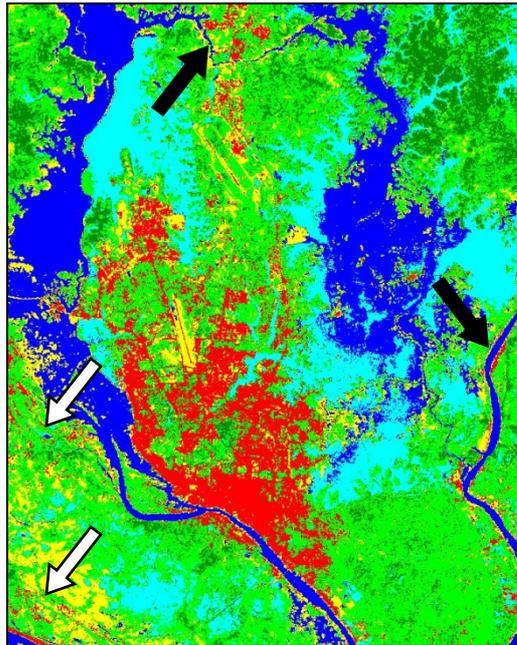


Figura 102 Mappa del 1989: aree affette da errore

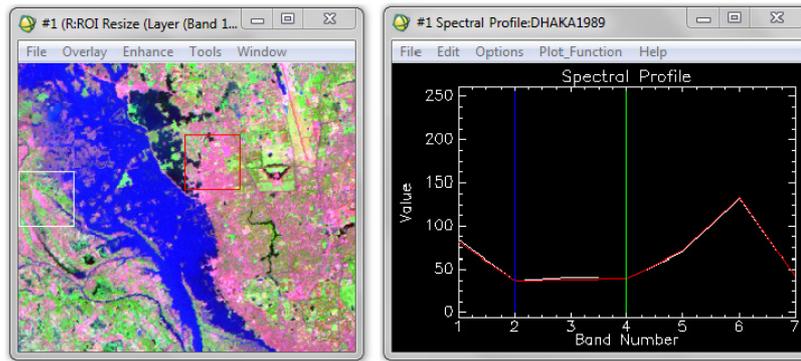


Figura 103 Confronto tra la firma spettrale di un pixel nell'area urbana (in rosso) e di un pixel su campi coltivati (in bianco) dove si rileva l'errore

Verosimilmente, tali depositi sono il risultato della sedimentazione di materiale fluviale trasportato dall'erosione dei fiumi. In effetti, nel 1988 (agosto e settembre), l'intero Bangladesh, compresa la città di Dhaka, fu colpito da una delle più catastrofiche alluvioni avvenute nel paese: le acque sommersero circa il 50% del territorio.

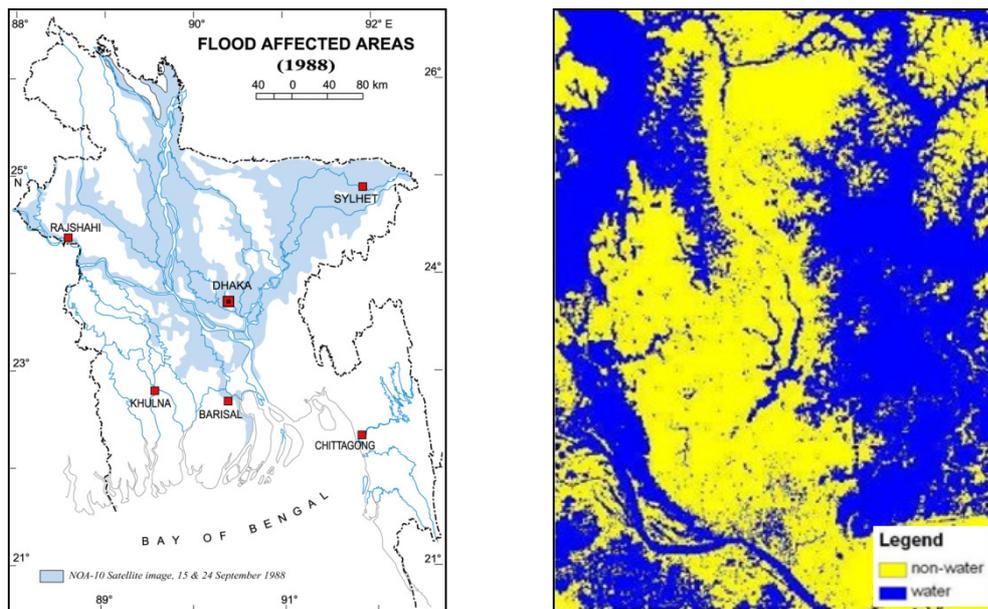


Figura 104 Zone interessate dall'alluvione del 1988 in Bangladesh e nelle'area di Dhaka (Fonte: <http://www.banglapedia.org> e *Remote sensing and gis mapping and monitoring the effect of land use/cover change on flooding in greater Dhaka* - A.M. Dewan, Y. Yamaguchi)

Per quanto riguarda la mappa del 2002, il problema principale, come già detto, è la presenza nubi. Benché la perdita di informazione da esse causata nell'area urbana sia stata risolta estraendo il perimetro urbano dall'immagine di febbraio dello stesso anno, il problema permane per le restanti classi di copertura. La copertura nuvolosa rappresenta uno dei

maggiori ostacoli per le immagini ottiche come quelle utilizzate nel presente studio. Inoltre, essendo il territorio investigato caratterizzato da distinti periodi monsonici, spesso le immagini relative a tale zona sono afflitte da suddetto problema. In questi casi, ma soprattutto al fine di monitorare situazioni di rischio alluvione che si presentano regolarmente durante la stagione dei monsoni, una possibile soluzione sarebbe l'impiego di immagini acquisite da sensori radar che operano in qualsiasi tipo di condizione atmosferica (*all weather use*) sia di giorno sia di notte.

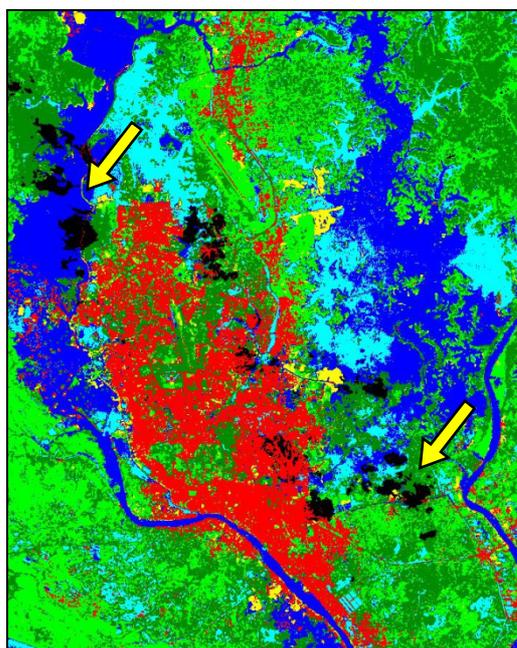


Figura 105 Mappa del 2002: zone dove permane la perdita di informazione causata dalla copertura nuvolosa (freccie gialle)

#### **4.7 CHANGE DETECTION: LAND USE/COVER CHANGE**

A causa dei problemi riscontrati nella classificazione dell'immagine del 1989, l'analisi dei cambiamenti di destinazione di uso del suolo (*land use, land cover change*) e la corrispondente espansione urbana dell'area Dhaka è stata condotta impiegando soltanto le mappe relative al 2000, al 2002 e al 2009. Nello specifico, della mappa del 2002 è stata utilizzata unicamente l'informazione relativa all'area urbana poiché, la mancanza di informazione in corrispondenza di altre classi, causata dalla copertura nuvolosa, non permette una corretta valutazione dei cambiamenti su tutto il territorio studiato.

Il confronto tra le suddette mappe è stato eseguito mediante la funzione *Change detection* presente in ENVI considerando come situazione iniziale la mappa del 2000 e come situazione finale ciascuna delle altre mappe. Tale funzione, permette di quantificare le modifiche verificatesi in immagini della stessa porzione di territorio prese in tempi differenti; nel caso specifico, individua i pixel che hanno cambiato classe informativa.

I risultati generati dalla procedura di *Change Detection* possono essere visualizzati sia in funzione del numero di pixel sia in termini di area e di percentuale ( (Final state - Initial state) / Initial state ). In questa trattazione, si riportano solo le statistiche in termini di superficie, ottenute rispettivamente dal confronto tra le mappe del 2000 e del 2009 e dalla comparazione tra le classi *Build up* del 2000 e del 2002.

Tabella 2 *Change detection* 2000-2009 (Area in km<sup>2</sup>)

		Initial state 2000					Class Total
		Build up	Bare soil	Vegetation	Cultivated land	Water	
Final state 2009	Unclassified	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Build up	60,8	2,7	3,2	38,4	6,1	111,1
	Bare soil	4,1	2,8	2,0	13,6	16,4	38,9
	Vegetation	2,0	0,8	44,6	35,4	9,0	91,8
	Cultivated land	5,6	6,5	35,3	129,8	29,9	207,0
	Water	3,0	1,6	4,8	20,7	112,1	142,3
	Class Total	75,4	14,4	90,0	237,9	173,4	0,0
Class Changes		14,7	11,6	45,4	108,1	61,4	0,0
Image Difference		35,7	24,5	1,8	-30,9	-31,1	0,0

Tabella 3 *Change detection* 2000-2002 (Area in km<sup>2</sup>)

		Initial state 2000						Class Total
		Build up	Bare soil	Vegetation	Cultivated land	Water	Unclassified	
Final state 2002	Cloud (Unclassified)	0,6	0,4	1,9	6,1	4,9	0,0	13,8
	Masked Pixels	61,8	1,4	0,4	15,8	5,7	0,0	85,0
	Class Total	75,4	14,4	90,0	237,9	173,4	0,0	0,0
	Class Changes	13,6	10,3	17,3	135,2	29,0	0,0	0,0
	Image Difference	9,5	-2,0	84,4	-110,4	4,6	13,8	0,0

Nelle tabelle sopra riportate, le classi relative allo stato iniziale sono riportate in colonna mentre in riga sono elencate quelle dello stato finale; per ogni categoria iniziale, la tabella indica come i pixel sono stati classificati nello stato finale. La riga *Class Total* indica la superficie totale occupata da ogni classe nello stato iniziale mentre la colonna *Class Total* riporta l'area totale di ogni classe nello stato finale. Nella riga *Class Change* è riportato il numero totale di pixel dello stato iniziale che ha cambiato classe e nella riga *Image Difference* viene indicata la differenza tra le superfici ugualmente classificate nelle due mappe, calcolata sottraendo, classe per classe, la superficie totale nello stato finale e la superficie totale nello stato iniziale. Un valore positivo di *Image Difference* indica che la dimensione della classe è aumentata, viceversa, un valore negativo ne indica la riduzione.

#### 4.7.1 Considerazioni

Dalle tabelle sopra riportate è stato possibile costruire una serie di grafici che evidenziano l'evoluzione del territorio indagato.

I grafici in Figura 106 e 107 mostrano rispettivamente la superficie occupata da ciascuna classe di copertura nel 2000 e nel 2009 e la variazione di uso del suolo nello stesso periodo.

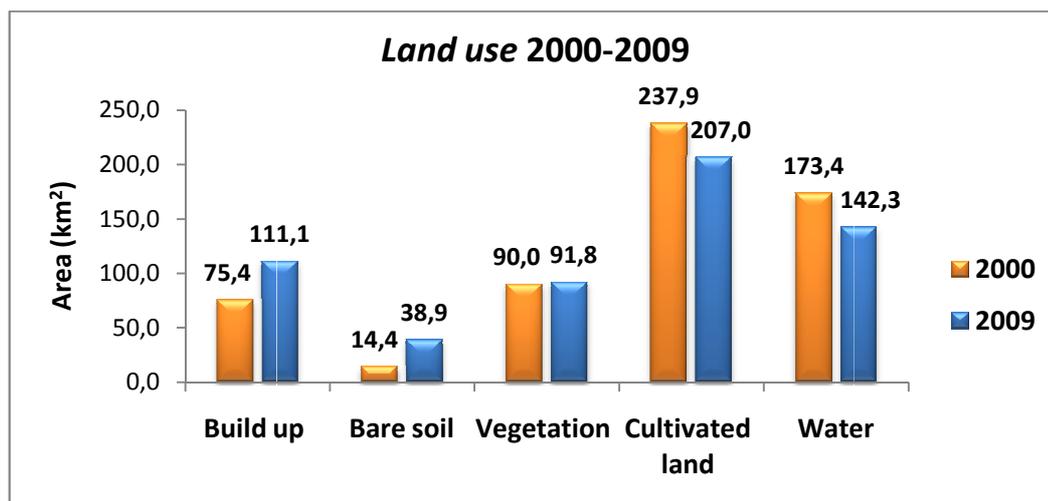


Figura 106 Confronto tra *Land use* relativo al 2000 e al 2009

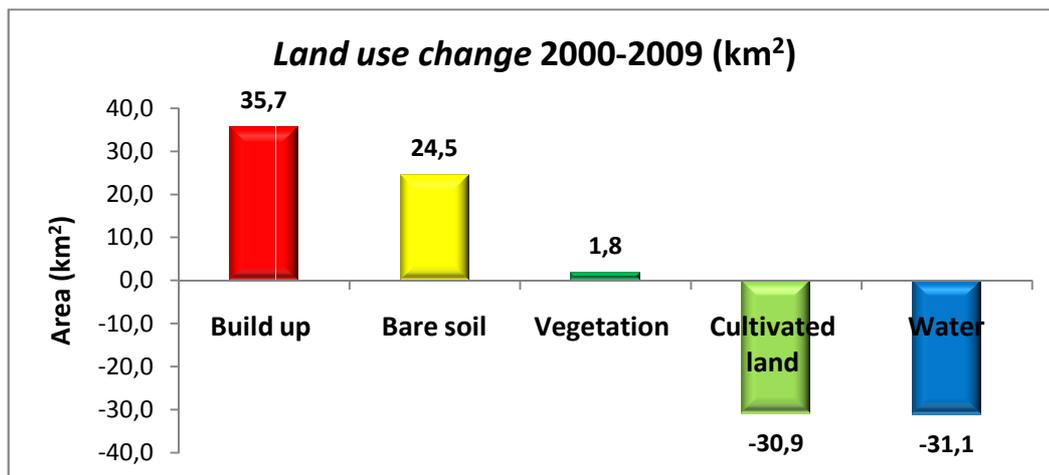


Figura 107 Cambiamenti di uso del suolo nel periodo 2000-2009

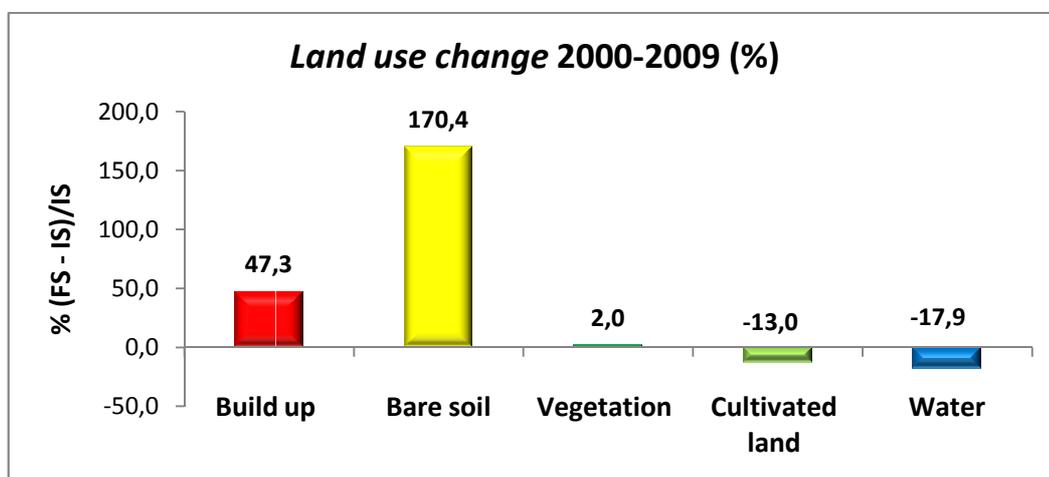


Figura 108 Cambiamenti di uso del suolo nel periodo 2000-2009 (%)

È possibile osservare un marcato aumento delle aree edificate (*Build-up*), si è passati da 75,4 km<sup>2</sup> nel 2000 a 111,1 km<sup>2</sup> nel 2009, e della superficie occupata da *Bare soil* che è più che raddoppiata, da 14,4 km<sup>2</sup> si è passati a 38,9 km<sup>2</sup>. Viceversa, si rileva la riduzione della classe di copertura *Water*, da 173,4 km<sup>2</sup> si è passati a 142,3 km<sup>2</sup>, e delle aree coltivate (*Cultivated land*), da 237,9 km<sup>2</sup> si è passati a 207 km<sup>2</sup>.

L'incremento della superficie edificata è la causa principale della riduzione delle aree coltivate; infatti, dal grafico in Figura 110, si rileva che dei 35,7 km<sup>2</sup> di cui è aumentata la classe *Build-up*, più del 90% (32,8 km<sup>2</sup>), nel 2000, erano campi coltivati.

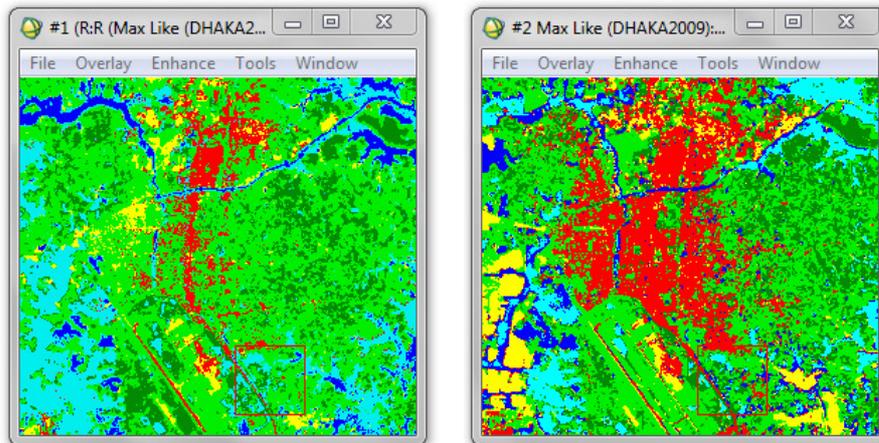


Figura 109 Espansione urbana in aree coltivate

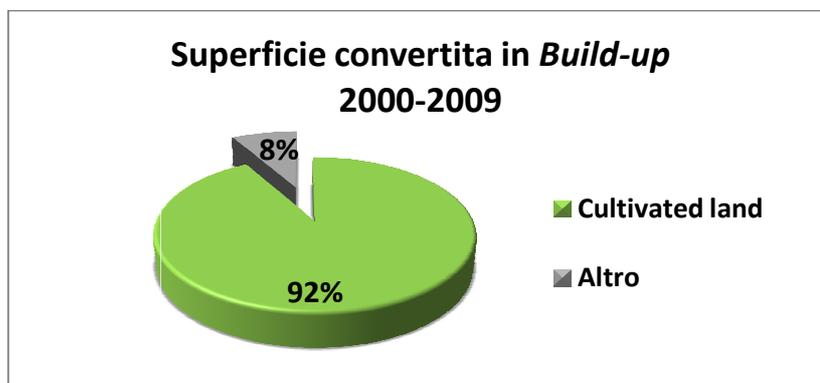


Figura 110 Superficie convertita in *Build-up* nel periodo 2000-2009

Mettendo a confronto i dati relativi alla sola classe *Build-up*, rispettivamente del 2000, 2002 e 2009 è stata realizzata la mappa in Figura 112 che permette di visualizzare la crescita urbana nel territorio studiato.

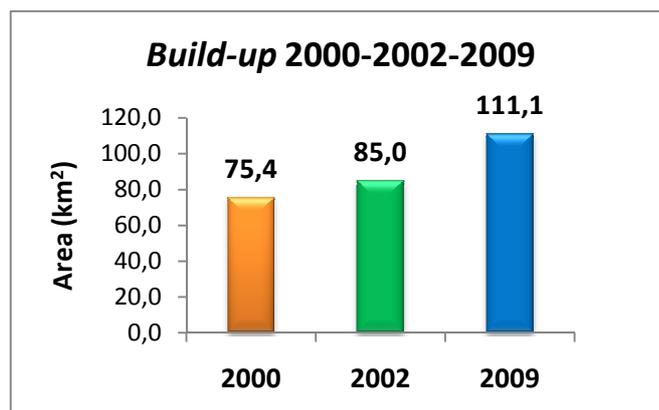


Figura 111 Area urbana nel 2000, 2002 e 2009

Alle immagini classificate è stato applicato il filtro Majority al fine di ridurre i pixel isolati derivanti dalla confusione tra le classi *Build-up* e *Bare soil* riscontrata durante la classificazione (par. 4.6.2 Considerazioni): definita la

dimensione *del kernel*, il pixel centrale viene assegnato alla classe a cui appartiene il numero maggiore di pixel presenti nel *kernel* stesso. Su ciascuna immagine classificata sono, poi, state isolate le aree relative alla classe *Build-up* e, a ognuna, è stato assegnato un colore diverso: rosso per l'urbano del 2000, verde per il 2002 e blu per il 2009. Visualizzandole contemporaneamente (Figura 112), in bianco si individua l'urbano presente in tutti e tre gli anni, in ciano si riconosce la crescita nel periodo 2002-2009 e in blu si rileva il perimetro urbano attuale.

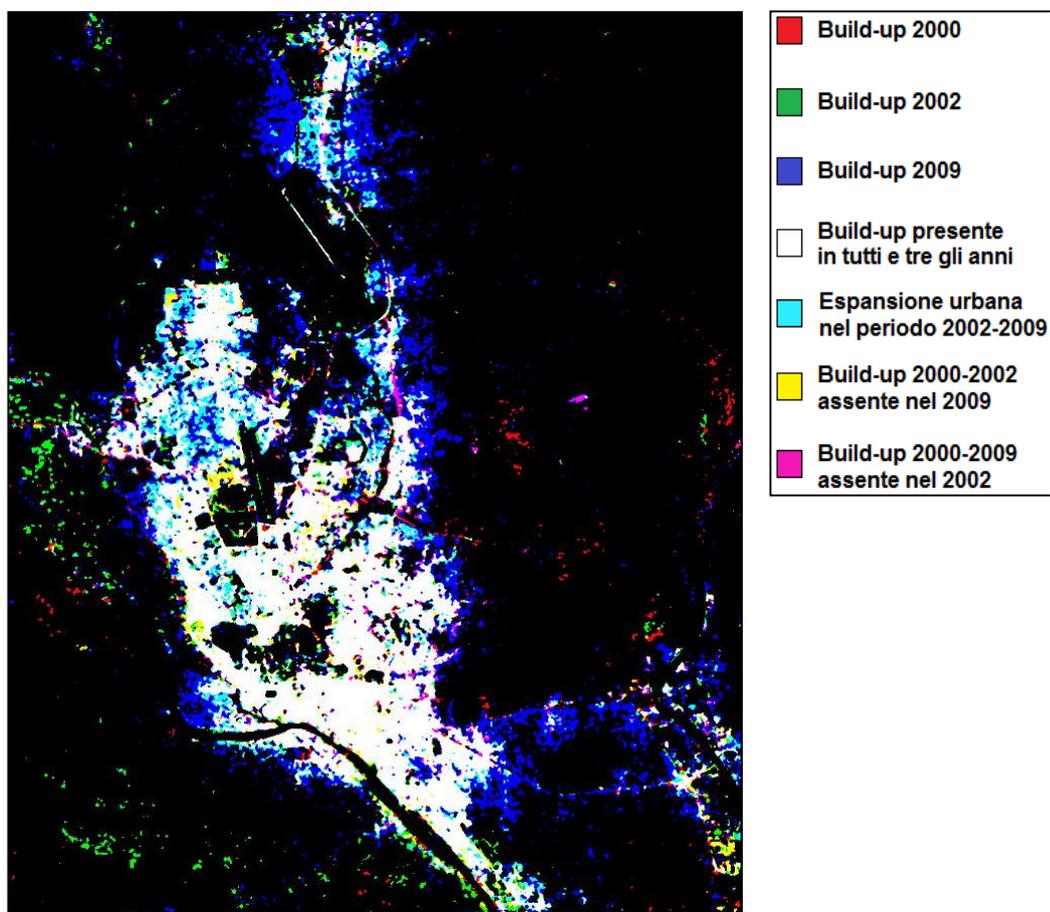


Figura 112 Crescita urbana della città (2000-2002-2009)

In rosso sono rappresentate aree classificate come urbano nell'immagine del 2000 che non sono più presenti nella mappa del 2009; in realtà, esse corrispondono alle zone dove è stata rilevata la confusione tra *Build-up* e *Bare soil* durante la classificazione dell'immagine del 2000. Un discorso analogo vale anche per alcune aree colorate di verde che rappresentano l'urbano nel 2002 non più presente nel 2009. La maggior parte di suddette

aree, però, si trova in corrispondenza delle fabbriche di mattoni dove i mattoni prodotti risultano posizionati nelle zone adiacenti le fabbriche stesse; per cui, la presenza di tali aree nel 2002 e non nel 2009 può dipendere sia dalla dismissione di alcune fabbriche, sia dalla diversa estensione di suddetti depositi.

In giallo si riconoscono aree edificate presenti nel 2000 e nel 2002 ma assenti nel 2009. Grazie al supporto di Google Earth, si è potuto verificare che ciò è dovuto, almeno in parte, alla demolizione di alcuni fabbricati (stabilimenti della Adamji Jute Mill) e di insediamenti abusivi nell'area urbana.



Figura 113 Stabilimenti della Adamji Jute Mill nel 2002 e nel 2009  
(Fonte: Google Earth)



Figura 114 Baraccopoli nell'area urbana di Dhaka nel 2002 e nel 2010  
(Fonte: Google Earth)

In generale, si osserva una maggiore estensione dell'agglomerato verso Sud-Est e nella zona più a Nord.

L'aumento di suolo nudo (*Bare soil*) è imputabile soprattutto alla presenza, nella mappa del 2009, di numerose di isole artificiali (realizzate riportando materiale estratto dalle sponde dei fiumi) che vengono create a causa della ridotta disponibilità di terreno edificabile nell'area urbana ormai congestionata. Le immagini sotto riportate mostrano lo sviluppo di una di

queste espansioni; in particolare, è possibile osservare come esse vadano ad invadere aree sistematicamente inondate dall'acqua durante il periodo dei monsoni e campi coltivati. Ciò è riscontrabile anche dal grafico in Figura 117: dei 24,5 km<sup>2</sup> di cui è aumentata la classe *Bare soil* rispettivamente il 60% (14,7 km<sup>2</sup>) e il 29% (7,2 km<sup>2</sup>), nel 2000, erano classificati come *Water* e *Cultivated land*.

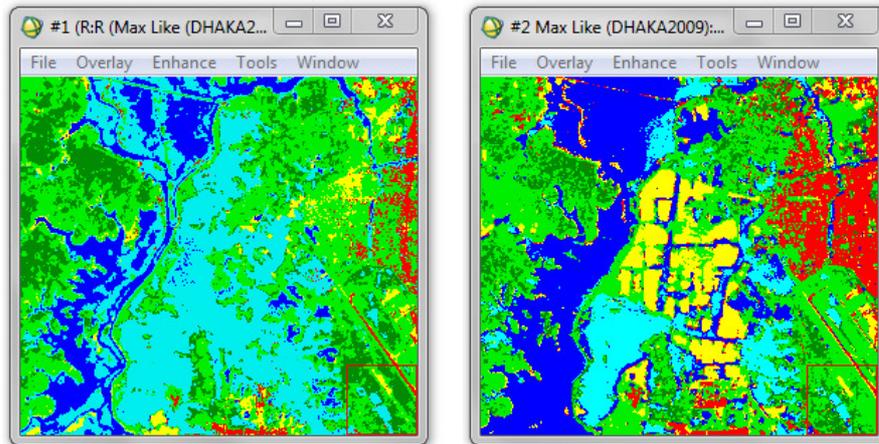


Figura 115 Sviluppo di isole artificiali nel quartiere Uttara nella zona Nord-Est della città



Figura 116 Sviluppo di isole artificiali nel quartiere Uttara (2004-2010)  
(Fonte: Google Earth)

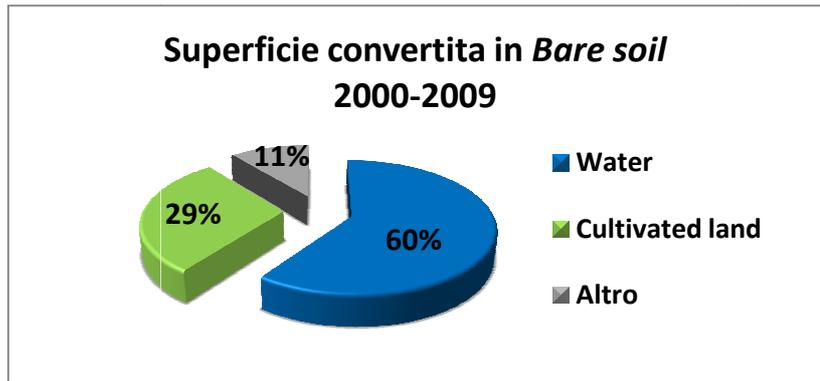


Figura 117 Superficie convertita in *Bare soil* nel periodo 2000-2009

Da quanto sopra esposto, è, quindi, possibile rilevare che la crescita della città ha comportato non solo l'aumento dell'edificato nell'area urbana, ma anche la realizzazione di isole artificiali al fine di "creare" nuovi spazi per far fronte alla ormai ridotta disponibilità di superficie edificabile. La conseguenza più rilevante di tale crescita è l'aumento delle superfici impermeabili e quindi la riduzione della capacità di drenaggio dei terreni, proprietà di fondamentale importanza per un territorio, come quello studiato, soggetto a periodi monsonici e ricorrenti inondazioni.

#### **4.8 AREE INONDABILI**

Il territorio studiato, come già detto più volte, risulta particolarmente afflitto dalle sistematiche inondazioni conseguenza delle ingenti piogge che investono l'area durante la stagione dei monsoni (giugno-ottobre). Al fine di studiare gli effetti di tale criticità, l'immagine dell'ottobre del 2009, che fotografa l'area in una situazione post-monsooni, è stata confrontata con due immagini del 2010 rispettivamente del mese di gennaio e di febbraio. Tale confronto ha permesso, innanzitutto, di ricavare i corpi idrici presenti in maniera permanente nell'area indagata e, successivamente, di studiare l'evoluzione delle inondazioni.

Su ciascuna immagine, mediante la funzione *Density slice* è stata isolata la classe *Water* e, procedendo in maniera simile a quanto sopra descritto per la crescita urbana, è stata creata la mappa in Figura 118: in rosso sono rappresentate le aree allagate rilevate nell'immagine di ottobre e non più presenti nei mesi successivi, il colore giallo è associato all'acqua presente solo in ottobre e gennaio, in blu si riconosce l'acqua presente

soltanto nell'immagine di febbraio; in particolare, le zone in bianco rappresentano laghi, fiumi e specchi d'acqua presenti in tutte e tre le immagini per cui, queste, sono state isolate, mediante la classificazione supervisionata a parallelepipedo (par. 3.1.1 Classificazione supervisionata), al fine di ricavare la mappa dei corpi idrici presenti in maniera permanente nell'area indagata (Figura 119).

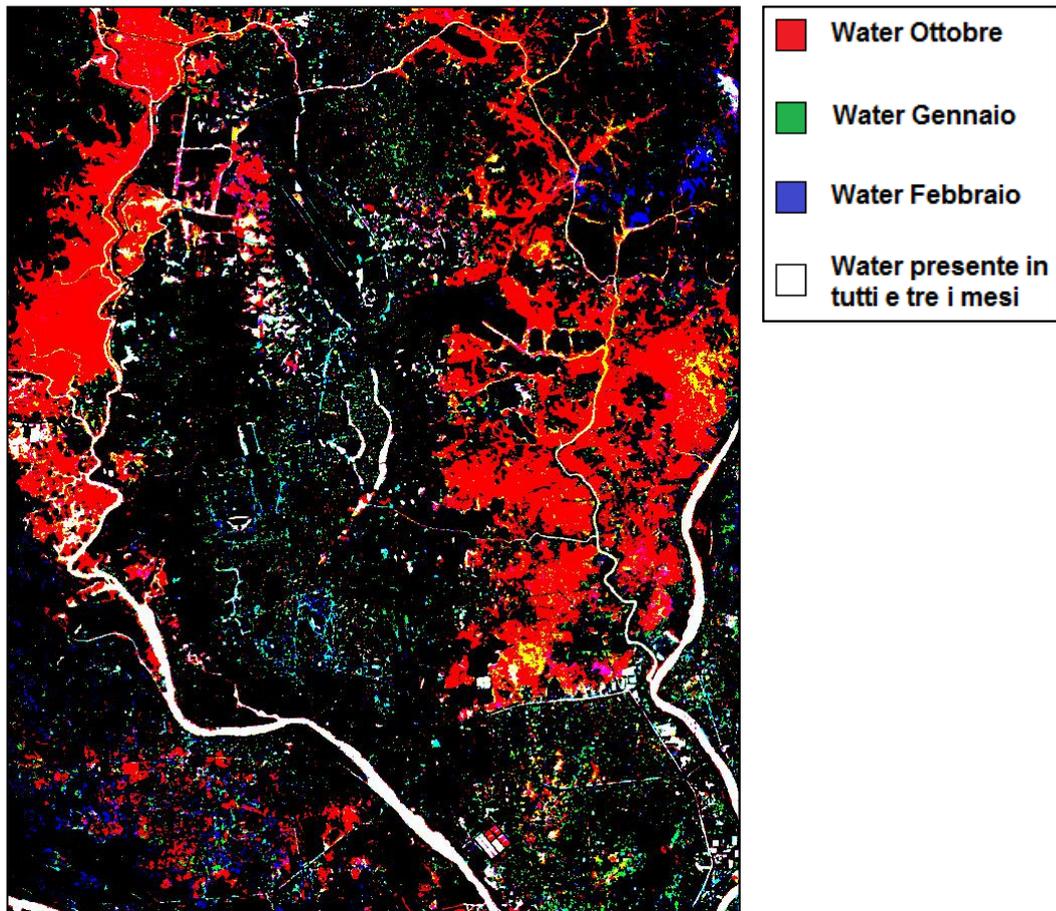


Figura 118 Sovrapposizione delle classi Water (ottobre 2009, gennaio 2010 e febbraio 2010)

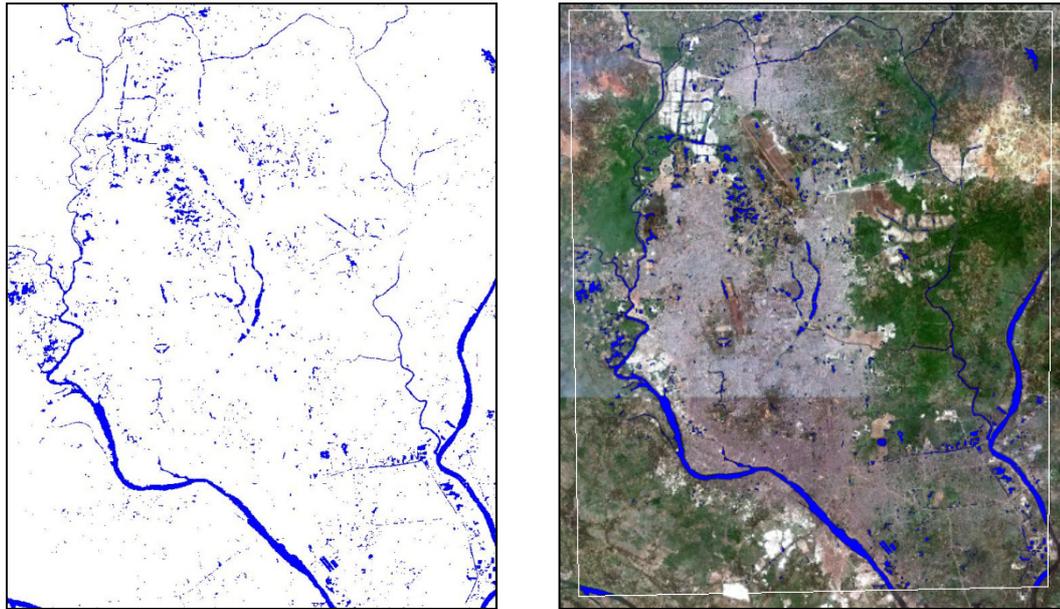


Figura 119 Corpi idrici presenti in tutte e tra le immagini classificate e sovrapposizione su Google Earth

Per verificare la correttezza di tale procedura, i risultati ottenuti, tradotti in *shape file*, sono stati confrontati, in ambiente GIS (Quantum GIS), con i dati, relativi ai fiumi principali, forniti da Ithaca. Dalla Figura 120 è possibile osservare la corrispondenza, relativamente ai corsi d'acqua maggiori, tra i due dati confrontati.

In definitiva si ottiene che la superficie dei corpi idrici sempre presenti sul territorio è di circa 27,1 km<sup>2</sup>.

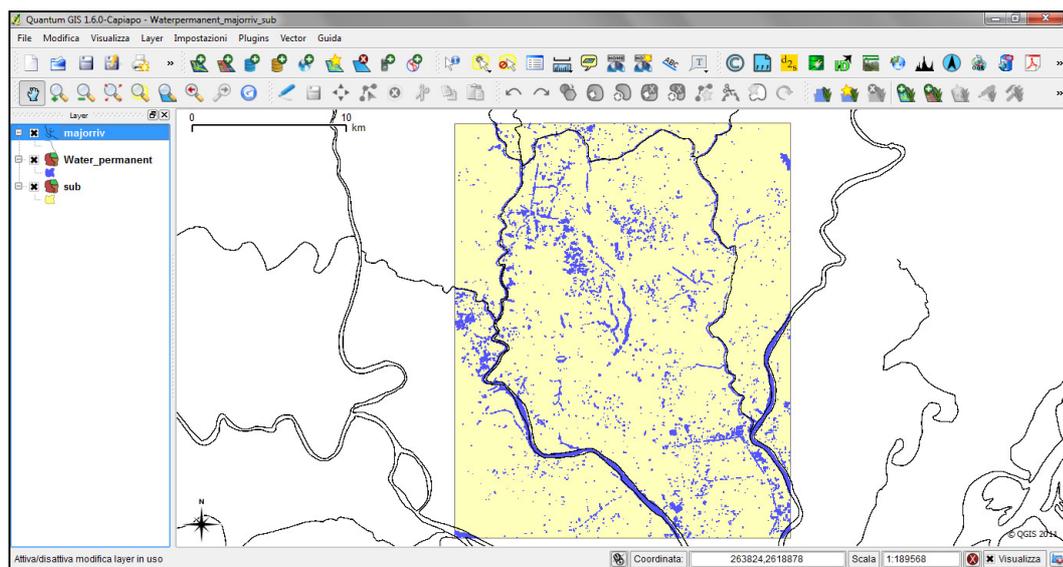


Figura 120 Confronto tra la mappa in Figura 112 e il dato relativo ai fiumi principali fornito da Ithaca

Le mappe di ottobre, gennaio e febbraio, sono state, poi, confrontate mediante una procedura di *Change detection*. Nello specifico, selezionando come stato iniziale la mappa di ottobre, che mostra il territorio allagato, si è voluto studiare l'evoluzione della classe *Water* rispettivamente a tre e quattro mesi di distanza.

Al fine individuare zone umide e ristagni d'acqua, generalmente presenti nei mesi successivi agli allagamenti, la classificazione delle immagini di gennaio e di febbraio (par.4.6 LA CLASSIFICAZIONE DELLE IMMAGINI LANDSAT) è stata effettuata aggiungendo la categoria *Wetland/lowland*.

Si riportano di seguito le statistiche ottenute.

Tabella 4 *Change detection* ottobre-gennaio (Area in km<sup>2</sup>)

		OTTOBRE						Class Total
		Build up	Bare soil	Vegetation	Cultivated land	Water	Wetland lowland	
GENNAIO	Build up	90,2	5,5	2,0	6,4	5,9	0,0	110,1
	Bare soil	6,9	28,3	2,5	24,0	3,9	0,0	65,6
	Vegetation	1,3	0,5	55,1	31,3	7,4	0,0	95,6
	Cultivated land	10,5	3,0	15,4	122,9	21,9	0,0	173,8
	Water	1,9	0,8	7,5	4,9	38,0	0,0	<b>53,0</b>
	Wetland/lowland	0,2	0,8	9,3	17,6	65,3	0,0	<b>93,1</b>
	Class Total	111,1	38,9	91,8	207,0	<b>142,3</b>	0,0	0,0
Class Changes	20,9	10,6	36,6	84,1	104,3	0,0	0,0	
Image Difference	-1,0	26,6	3,8	-33,2	<b>-89,4</b>	93,1	0,0	

Tabella 5 Change detection ottobre-febbraio (Area in km<sup>2</sup>)

		OTTOBRE						Class Total
		Build up	Bare soil	Vegetation	Cultivated land	Water	Wetland lowland	
FEBBRAIO	Build up	88,1	6,0	1,8	5,5	4,3	0,0	105,8
	Bare soil	7,6	27,0	2,8	28,8	4,7	0,0	70,8
	Vegetation	3,6	1,0	50,4	30,7	15,7	0,0	101,4
	Cultivated land	10,1	3,8	23,8	124,1	52,3	0,0	214,1
	Water	1,5	0,7	6,4	5,5	32,1	0,0	<b>46,3</b>
	Wetland/lowland	0,1	0,4	6,5	12,4	33,3	0,0	<b>52,7</b>
	Class Total	111,1	38,9	91,8	207,0	<b>142,3</b>	0,0	0,0
Class Changes	23,0	12,0	41,4	82,9	110,3	0,0	0,0	
Image Difference	-5,3	31,9	9,6	7,1	<b>-96,1</b>	52,7	0,0	

Si osserva che, nel mese di ottobre, 142,3 km<sup>2</sup> del territorio sono classificati come *Water*. Tra ottobre e gennaio, si registra una diminuzione della classe *Water* di 89,4 km<sup>2</sup>; come riportato nel grafico in Figura 121, l'acqua lascia spazio a campi coltivati e, soprattutto, a grandi zone acquitrinose.

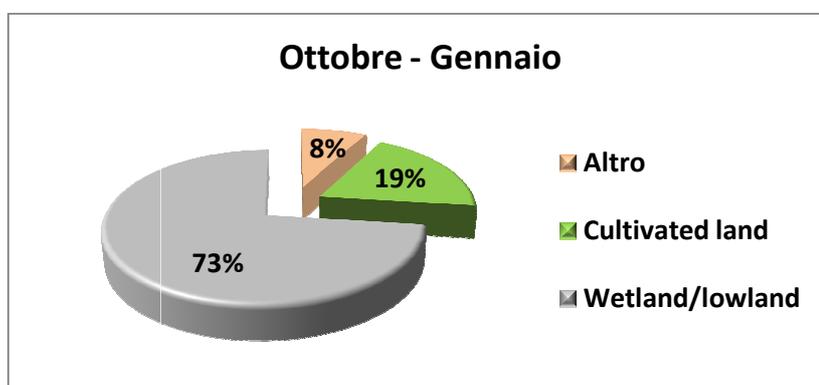


Figura 121 Riduzione della classe *Water* nel periodo ottobre-gennaio

Dopo quattro mesi, a febbraio, la classe *Water* ha subito una riduzione di 96,1 km<sup>2</sup>; anche in questo caso, lo spazio occupato dagli allagamenti in ottobre risulta sostituito da zone umide e campi coltivati ma in proporzioni diverse: 46,7 km<sup>2</sup> di aree coltivate (48%) e 33,3 km<sup>2</sup> (35%) di *Wetland/lowland* (Figura 122).

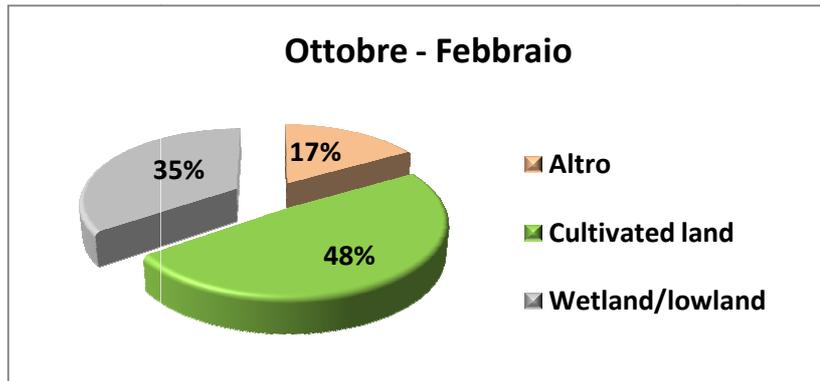


Figura 122 Riduzione della classe *Water* nel periodo ottobre-febbraio

Infatti, anche la classe *Wetland/lowland* è diminuita: si è passati da 93,1 km<sup>2</sup> nel mese di gennaio a 52,7 km<sup>2</sup> in febbraio e, applicando la procedura di *Change detection* alle mappe di gennaio e febbraio, si è rilevato che tale riduzione coincide con un aumento di campi coltivati (Figura 123).

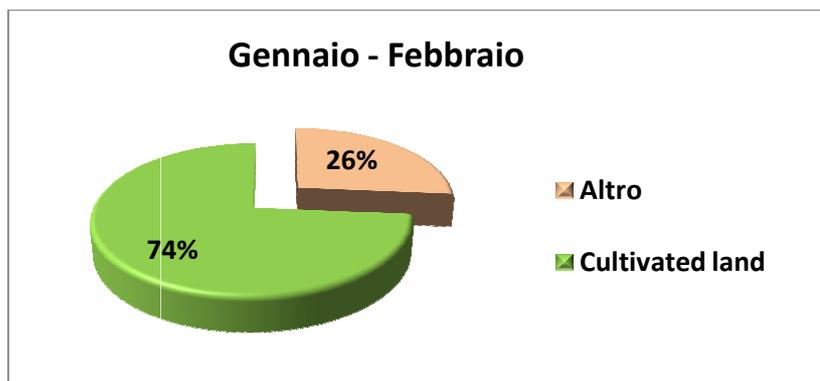


Figura 123 Riduzione della classe *Wetland/lowland*

In definitiva, dopo quattro mesi, le aree allagate in ottobre si presentano come zone di intensa attività agricola (Figure 124 e 125). Nello specifico, si tratta di estese piantagioni di riso della varietà *Boro* individuate grazie all'ausilio dei dati relativi all'uso del suolo, forniti da Ithaca (Figura 126). Infatti, i grandi ristagni d'acqua, lasciati dalla stagione dei monsoni, vengono sfruttati per quelle coltivazioni che, come il riso, richiedono notevoli quantità d'acqua.

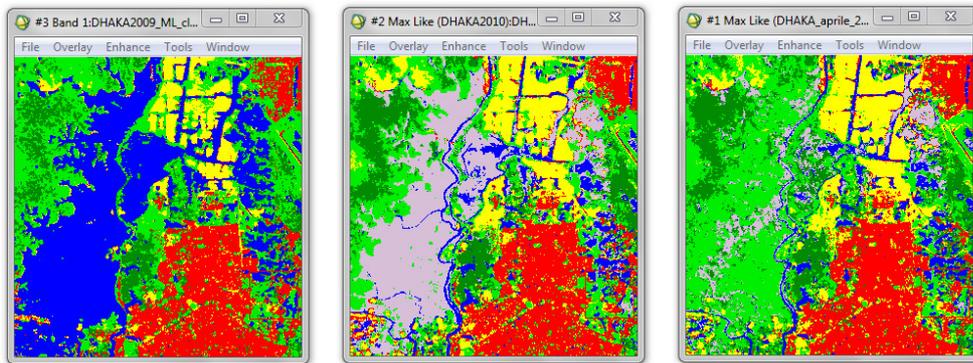


Figura 124 A sinistra allagamenti in ottobre, al centro ristagni idrici in gennaio, a destra campi coltivati in febbraio



Figura 125 Dettaglio degli allagamenti in ottobre, dei ristagni idrici in gennaio e campi coltivati in febbraio

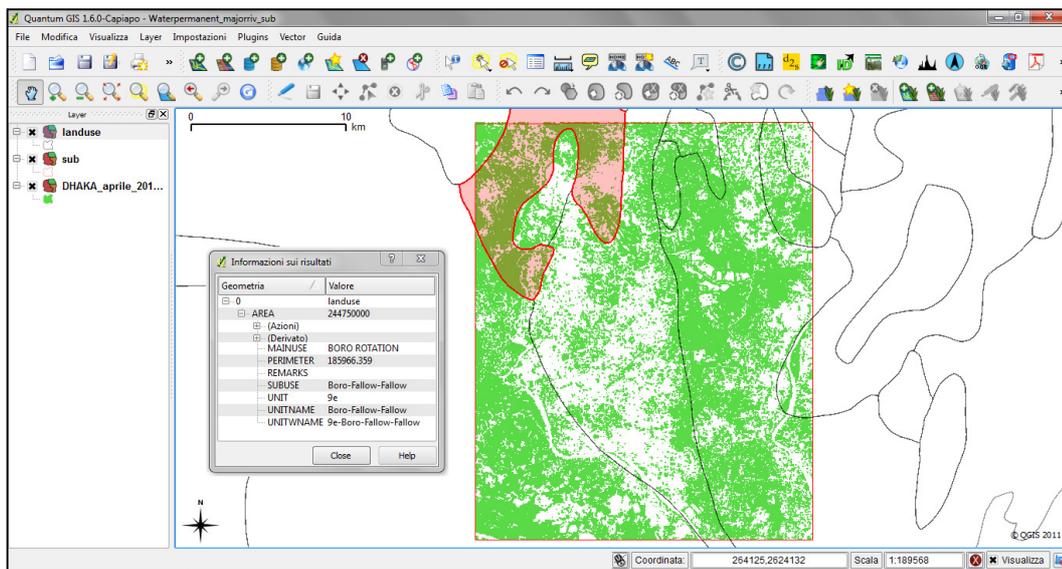


Figura 126 Sovrapposizione *Cultivated land* (febbraio 2010) e il dato di uso del suolo di Ithaca

#### 4.9 AGGIORNAMENTO BANCA DATI

Le informazioni prodotte dall'elaborazione delle immagini satellitari possono essere impiegate sia per la realizzazione di mappe tematiche sia per l'aggiornamento di banche dati esistenti al fine di rendere disponibili indicazioni sempre più dettagliate relativamente a un certo territorio.

Nello specifico, al fine di integrare le informazioni derivanti dall'analisi delle aree inondabili con quelli forniti da Ithaca, sono state effettuate una serie di operazioni in ambiente GIS, impiegando i software *open source* Quantum GIS, per la visualizzazione dei risultati, e Grass (*Geographic Resources Analysis Support System*). Innanzitutto, la classe *Water*, della mappa dei ottobre, è stata tradotta in *shapfile* e ad essa è stata sottratta l'acqua presente in maniera permanente sul territorio studiato. Questo ha permesso di ricavare la mappa delle inondazioni: l'acqua presente in maniera permanente si estende su circa 27,1 km<sup>2</sup>, mentre la superficie coperta dall'acqua in ottobre è di 142,3 km<sup>2</sup>, per cui la superficie allagata risulta avere un'estensione di 115,2 km<sup>2</sup>, ovvero circa il 20% dell'intera area studiata (591,2 km<sup>2</sup>). Mediante un'operazione di intersezione tra i layer vettoriali della mappa delle inondazioni e delle suddivisioni amministrative del Bangladesh, è stata creata una mappa in cui, per ogni area allagata, oltre all'estensione, è noto il distretto o il sottodistretto colpito (Figura 127); quindi, tramite una semplice somma, è possibile, per ciascun distretto presente nell'area di studio, conoscere la superficie allagata (Tabella 6 e Figura 128).

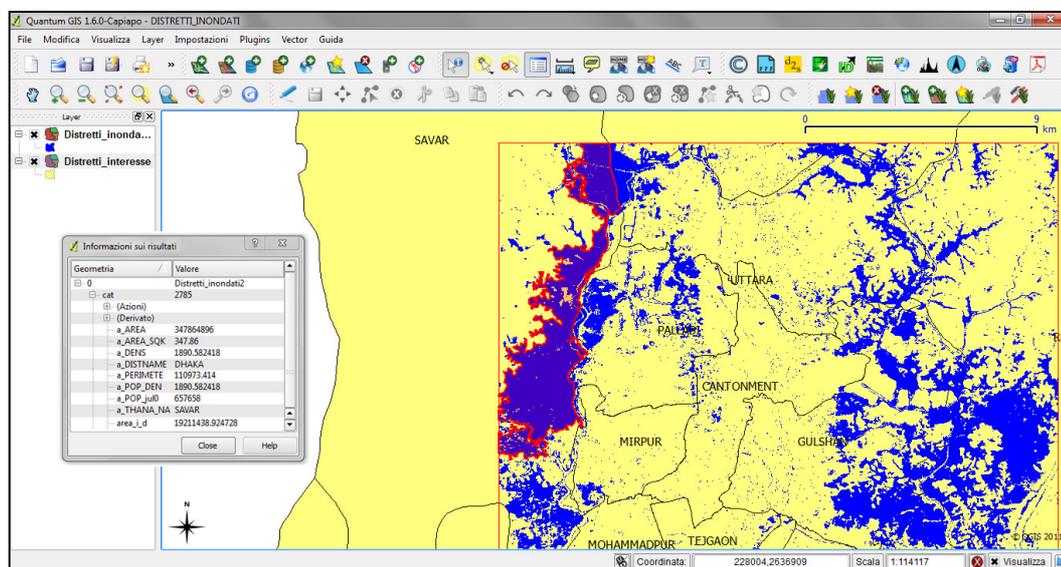


Figura 127 Mappa Distretti inondati

Tabella 6 Area inondata per ogni distretto

THANA NAME	SUPERFICIE ALLAGATA (km <sup>2</sup> )
CANTONMENT	1,0
DEMRA	13,5
GULSHAN	15,1
KERANIGANJ	6,8
PALLABI	6,4
SABUJBAGH	2,7
SAVAR	26,4
UTTARA	9,6
GAZIPUR SADAR	2,5
NARAYANGANJ SADAR	1,7
RUPGANJ	26,4
Altro	2,9
<b>TOTALE</b>	<b>115,2</b>

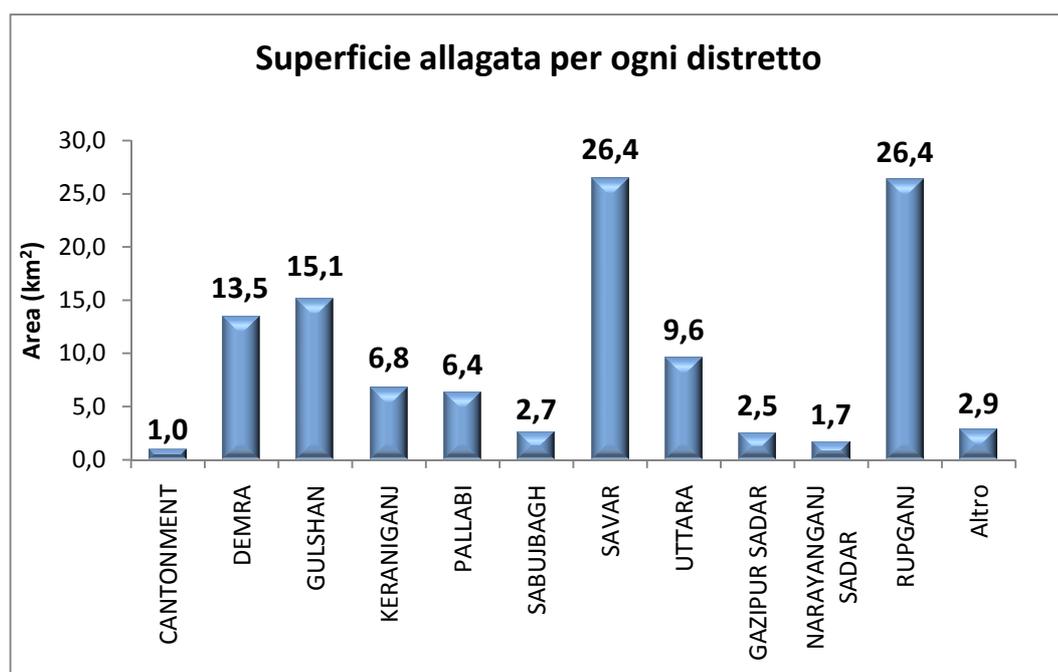


Figura 128 Superficie allagata per ogni distretto

## CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi è un esempio di come le immagini satellitari multispettrali possano essere utilizzate quale supporto per l'aggiornamento di banche dati territoriali esistenti o per la realizzazione di nuovi prodotti a costi relativamente contenuti e in tempi più brevi rispetto ai metodi di rilievo tradizionali.

Gli ambiti applicativi sono molto ampi e si integrano in processi di gestione del territorio di diversa natura e scopo: ai fini del presente studio, vanno certamente ricordate le analisi sui cambiamenti del territorio (sia per scopi di pianificazione che nella gestione di complessi processi di trasformazione legati ad aspetti produttivi o ambientali) e il supporto ad attività legate alla gestione del rischio nei suoi diversi aspetti, dalla fase di mitigazione a quella di emergenza e della ricostruzione.

Il presente lavoro è nato da una collaborazione con Ithaca, associazione no-profit, che, sfruttando in particolare le immagini satellitari all'interno di sistemi di gestione di dati geospaziali (GIS), realizza prodotti cartografici a supporto di attività del *World Food Programme* (WFP) legate al rischio, sia nella fase di previsione di situazioni di emergenza (Early Warning), sia nella fase di valutazione delle conseguenze di eventi calamitosi.

L'ambito geografico studiato nella tesi è il Bangladesh; come per altri paesi in via sviluppo, il Bangladesh presenta una forte carenza di sistemi aggiornati per la gestione del territorio, carenza molto significativa per un territorio che risente di fenomeni fortemente dinamici, legati sia ad aspetti antropici (es. urbanizzazione di massa) che ad eventi naturali (es. le frequenti e periodiche alluvioni).

L'analisi condotta su immagini satellitari multitemporali ha consentito di individuare alcune criticità presenti sul territorio, tra cui le ripercussioni ambientali conseguenti all'espansione urbana della capitale Dhaka e le aree sistematicamente inondate durante la stagione dei monsoni.

In particolare, le dinamiche di sviluppo dell'area urbana della città di Dhaka nel decennio 2000-2009, e gli allagamenti che regolarmente si presentano in questo territorio nel periodo monsonico, sono stati

quantificati confrontando (*change detection*) mappe tematiche ottenute dalla classificazione supervisionata di immagini multispettrali Landsat.

L'analisi ha rivelato che la crescita della città ha comportato non solo l'aumento significativo delle aree edificate (da 75,4 km<sup>2</sup> a 111,1 km<sup>2</sup>), ma anche la realizzazione di isole artificiali al fine di creare nuovi spazi edificabili, con la conseguente diminuzione di terreni coltivati (da 237,9 km<sup>2</sup> a 207 km<sup>2</sup>) e l'invasione di aree soggette a inondazione. La procedura di *change detection* ha, inoltre, evidenziato che gli allagamenti, conseguenti alla stagione monsonica, interessano circa il 20% (115,2 km<sup>2</sup> su 591,2 km<sup>2</sup>) dell'intera area studiata nel mese di ottobre, per poi lasciare spazio a zone acquitrinose e campi coltivati nei successivi tre/quattro mesi.

Le immagini multispettrali utilizzate, grazie alle diverse bande disponibili che permettono di riconoscere specifiche firme spettrali per gli oggetti osservati, si sono ben prestate all'identificazione dei diversi tipi di copertura presenti sul territorio. Le procedure di validazione hanno presentato infatti valori di accuratezza che superano il 90%.

La sperimentazione ha evidenziato alcune problematiche nella fase di selezione delle immagini (che dovevano soddisfare specifici criteri) e nella fase di classificazione; si pensi per esempio alla presenza di nuvole che causano la perdita di informazione in corrispondenza delle zone coperte.

Benché sia stato possibile acquisire numerose scene dall'archivio Landsat, una delle maggiori difficoltà incontrate è stata quella di reperire dati di riferimento (punti di verità a terra) necessari per la validazione delle mappe tematiche prodotte dalla classificazione. Il problema è stato risolto, solo in parte, mediante l'ausilio del portale *Google Earth*, che fornisce immagini dell'intera area studiata a partire dal 2004. La validazione delle mappe antecedenti, invece, è stata effettuata solo qualitativamente mediante controllo visivo.

I dati derivanti dallo studio multitemporale trovano riscontro in letteratura e consentono di ampliare la base informativa disponibile per questo territorio, sia in termini spaziali che temporali. I risultati ottenuti possono

risultare utili ai fini di una pianificazione territoriale controllata e sostenibile, nonché per la pianificazione di interventi di mitigazione del rischio legato alle inondazioni, per la gestione dei soccorsi durante gli eventi alluvionali e per il monitoraggio nel tempo delle fasi di ripristino.

## **BIBLIOGRAFIA**

Brivio P. A., Lechi G, Zilioli E. (2006) *Principi e metodi di telerilevamento*. Novara, Città Studi Edizioni.

Trianni G. (2006) *Introduzione al Telerilevamento per l'osservazione della Terra*. Dispense. Università degli Studi di Pavia, Facoltà di Ingegneria - Dipartimento di Elettronica.

Pierdicca N. (2006) *Sensori di Telerilevamento*. Slide del Corso Telerilevamento Ambientale. Università "La Sapienza" di Roma, Facoltà di Ingegneria - Dipartimento di Elettronica.

Bitelli G., Gusella L., Mognol A. (2007) *Caratterizzazione delle immagini satellitari per la mitigazione, la risposta e il monitoraggio di eventi calamitosi naturali ed antropici*. Atti 11<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA. Torino, 2007.

Ajmar A, Boccardo P., Coletta A., Tonolo F.G., Perez F., e Veloso C. (2008) *Il supporto italiano nella gestione delle emergenze ambientali: il ciclone in Myanmar e il terremoto in Cina*. Atti 12<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA. L'Aquila, 2008.

Rahman H. (2002) *Agricultural Land Use and Land susceptibility in Bangladesh: An overview*. Dhaka University, Department of Soil, Water and Environment.

Guler M., Yomralioglu T., Reis S. (2006) *Using landsat data to determine land use/land cover changes in Samsun, Turkey*. Environ Monit Assess 127: 155–167.

De Sherbinin A. (2002) *A CIESIN Thematic Guide to Land-Use and Land-Cover Change (LUCC)*. Columbia University, Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Palisades, NY, USA.

Di Girolamo P.A. (2006) *A Comparison of Change Detection Methods in an Urban Environment Using LANDSAT TM and ETM+ Satellite Imagery*:

*A Multi-Temporal, Multi- Spectral Analysis of Gwinnett County, GA 1991-2000.* Georgia State University, Digital Archive @ GSU.

Rahman G., Alam D., Islam S., (2008) *City Growth with urban Sprawl and Problems of Management for Sustainable Urbanization.* 44<sup>th</sup> ISOCARP Congress (2008).

Islam S., Rahman R., Shahabuddin A.K.M., Ahmed R. (2010) *Changes in wetlands in dhaka city: Trends and physico-environmental consequences.* J. Life Earth Sci., Vol. 5: 37-42.

Harum S.M.R. (2009) *Remote Sensing Techniques Used for Flood Mapping in Bangladesh. A Literature Review.*

Dewan A., (2010) *"Bloated Dhaka"*. The Daily Star, 18/02/2010.

Dewan A., Yamaguchi Y., (2009) *Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: using remote sensing to promote sustainable urbanization.* Applied Geography, 29 (3): 390-401.

Zeug G., Eckert S., (2010) *Population Growth and Its Expression in Spatial Build- up Patterns: The Sana'a, Yemen Case of Study.* Remote Sensing Journal, Vol. 2: 1014-1034.

Meliadis I., Meliadis M. (2011) *Multi-temporal Landsat image classification and change analysis of land cover/use in the Prefecture of Thessaloiniki, Greece.* IAEES (International Academy of Ecology and Environmental Sciences), 1 (1): 15-25.

Boakye E., Odai S. N., Adjei K. A., Annor F. O. (2008) *Landsat Images for Assessment of the Impact of Land Use and Land Cover Changes on the Barekese Catchment in Ghana.* European Journal of Scientific Research, Vol.22 No.2: 269-278.

Bauer M.E., Yuan F., Saway K.E. (2003) *Multi-temporal Landsat image classification and change analysis of land cover in the twin cities*

*(Minnesota) metropolitan area. Second International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images. Ispra, 2003.*

Symeonakis E., Caccetta P.A., Wallace J.F., Koukoulas S. (2006) *Multi-temporal land use/cover change detection in the Spanish Mediterranean Coast. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34.*

Planetek (2006) *Corso di Telerilevamento On line. Sito web Planetek Italia: <http://www.planetek.it/corsotlr/index.asp>*

## **SITOGRAFIA**

<http://www.itvis.com>

<http://www.ithaca.polito.it/>

<http://glovis.usgs.gov/>

<http://edcsns17.cr.usgs.gov/NewEarthExplorer/>

<http://www.eduspace.esa.int>

<http://www.banglapedia.org>

<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>

<http://it.wikipedia.org>

<http://www.sparrso.gov.bd/>

<http://www.bwdb.gov.bd/>

<http://landsat.org/>

<http://tlclab.unipv.it>

<http://www.planetek.it>

<http://www.dhakacity.org/>