

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

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

DICAM – Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali

TESI DI LAUREA

in

Telerilevamento LS

**ANALISI DI DATI TELERILEVATI OTTICI E RADAR
PER LA GESTIONE DEI DISASTRI: LE ALLUVIONI
DEL BANGLADESH**

CANDIDATO

Federica Sansò

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Gabriele Bitelli

CORRELATORI

Ing. Fabio Giulio Tonolo

Ing. Emanuele Mandanici

Ing. Daniele Saverio Torlai Triglia

Anno Accademico 2010/2011

Sessione I

INDICE

Indice	1
Indice delle figure.....	3
Indice delle tabelle.....	8
Introduzione.....	9
Capitolo 1	11
Il telerilevamento e la classificazione delle immagini	11
1.1 Generalità.....	11
1.2 Principi base del Telerilevamento.....	11
1.2.1 L'energia elettromagnetica.....	11
1.2.2 Lo spettro elettromagnetico.....	13
1.2.3 Interazioni con l'atmosfera e con la superficie terrestre	15
1.2.4 Il concetto di risoluzione	19
1.3 I sensori e le principali missioni satellitari	22
1.4 La classificazione delle immagini	26
1.4.1 Metodi di classificazione automatica	27
1.4.2 Classificazione supervisionata	28
1.4.3 Classificazione non supervisionata (unsupervised).....	29
1.4.4 Valutazione dell'accuratezza.....	29
1.4.4.1 Accuratezza ed errori di una mappa tematica.....	29
1.4.4.2 La matrice di errore	30
Capitolo 2	32
Il telerilevamento nella gestione dei disastri ambientali e le organizzazioni internazionali.....	32
2.1 Il telerilevamento come supporto nella gestione dei disastri ambientali: generalità	32
2.1.1 Studio di frana.....	34
2.1.2 Gli incendi boschivi.	37
2.1.3 Il controllo dei versamenti in mare di idrocarburi	40

2.1.4 I Terremoti	41
2.1.5 Le alluvioni	45
2.2 Le organizzazioni e gli enti internazionali.....	50
2.2.1 ITHACA.....	52
Capitolo 3	54
Il caso di studio:le alluvioni in Bangladesh.....	54
3.1 Inquadramento geografico	54
3.2 Le cause delle alluvioni in Bangladesh	56
3.3 La natura delle alluvioni in Bangladesh.....	58
Capitolo 4	60
La sperimentazione sul caso di studio.....	60
4.1 Descrizione dei dati e il software impiegato.....	60
4.2 Pre-processamento dei dati	61
4.2.1 La fase preliminare sulle immagini ottiche.....	62
4.2.2 La fase preliminare sui dati Radar	63
4.3 La classificazione delle immagini	65
4.3.1 La classificazione dell'immagini ottiche	65
4.3.2 La classificazione dell'immagine CosmoSkymed	73
4.4 I problemi riscontrati nella classificazione delle immagini ottiche	78
4.5 I problemi nella classificazione dell'immagine CosmoSkymed	82
4.6 Interpretazione in ambiente GIS di dati estratti dalla classificazione dell'immagine ASTER	86
Conclusioni.....	88
Bibliografia.....	91
Sitografia	95

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Campo elettromagnetico.....	12
Figura 2- Relazioni tra lunghezza d'onda, frequenza ed energia.....	13
Figura 3- Spettro elettromagnetico con particolare del visibile	13
Figura 4- Bande maggiormente utilizzate nel telerilevamento	14
Figura 5- Interazioni raggio elettromagnetico-atmosfera; raggio elettromagnetico-superficie terrestre.....	16
Figura 6 - Firme spettrali di vegetazione verde, del suolo e dell'acqua	18
Figura 7- Effetti tipici della clorofilla e dei sedimenti sulla riflettanza dell'acqua; (a) acque oceaniche, (b) acqua torbida, (c) acqua con clorofilla.....	19
Figura 8- IFOV	20
Figura 9- Stessa area osservata a diverse risoluzioni	20
Figura 10- Stessa scena ripresa con diversa risoluzione radiometrica	21
Figura 11- Schema principale di un sensore	23
Figura 12- Confronto tra sensori attivi e passivi	23
Figura 13- Classificazione supervisionata (a) e classificazione non supervisionata (b).....	27
Figura 14- Immagini SPOT acquisite rispettivamente prima e dopo la frana che si è verificata nel Novembre 2000, sotto la cresta del Monte Mongart, nella parte Nord Occidentale della Slovenia. Immagini usate per stimare il danno complessivo e l'impatto della frana.....	35
Figura 15- Sovrapposizione tra la mappa dell'area e i PS classificati con riferimento alla velocità espressa in mm/anno.....	36
Figura 16- a) Mappa delle aree bruciate e della frequenza degli incendi boschivi in Catalogna nel periodo tra il 1975 e il 1993. b)Evoluzione del quoziente NDVI (QNDVI) tra area bruciata e area di controllo prima e dopo l'incendio del Maresme nel 1983 in Spagna.....	38

Figura 17 - Mappa tematica delle diverse categorie di rischio d'incendio del distretto di Dobieszyn	39
Figura 18- a) Chiazza d'idrocarburi al largo dell'Argentario (ERS.). La chiazza più larga è lunga circa 22 km; b) Chiazza provocata dalla rottura di un oleodotto nella Baia di Guanabara vicino a Rio de Janeiro (RADARSAT); c)Chiazza a largo di Ancona (SAR).....	41
Figura 19- a)Immagine modulo spotlight (in coordinate radar) acquisita il 12-12-2009 dal sensore CSK2; b) Immagine modulo spotlight (in coordinate radar) acquisita il 21-01-2010 dal sensore CSK1 in cui è stato evidenziato in rosso l'area costiera dissestata; c) Interferogramma differenziale post-sismico fra l'acquisizione del 21-01-2010 e quella del 29-01-2010 sovrapposto all'immagine modulo (in coordinare radar). Ad ogni ciclo di colore corrisponde una deformazione lungo la line di vista del sensore di circa 15.6mm. La baseline perpendicolare è di circa 67m (www.protezionecivile.it).....	44
Figura 20- Immagini pre e post tzunami, che comprendono la zona di Minamisanriku e l'impianto nucleare di Onagawa (Giappone). Solo in Minamisanriku più di 10.000 persone sono disperse (www.gim-international.com).	45
Figura 21- Immagini TerraSAR-X del bacino fluviale Savern, Inghilterra: a)immagine pre-alluvione;b) immagine post-alluvione;c)Immagine dell'Indice di Cambiamento Normalizzato (NCI); classificazione dell'area derivata dal modello marcoviano ibrido	47
Figura 22- Classificazione supervisionata determinata con l'algoritmo della massima verosimiglianza su un immagine Landsat ETM+ del Settembre 1999, riva del fiume Senegal.....	48
Figura 23- Immagini SPOT4 dell'estuario del fiume Senegal:a)area in condizioni normali rilevata ad Ottobre 2001;b)area alluvionata rilevata nell'Ottobre 1999; c)Classificazione supervisionata della zona.....	48
Figura 24- Immagine METEOSAT ripresa il 3 Febbraio 2011 che riprende il ciclone Yasi, Australia.	49

Figura 25 - Alluvione in Pakistan - Lago di Manchar. Mappa realizzata da ITHACA il 23 Settembre 2010. La mappa è stata prodotta dall'analisi di immagini CosmoSkymed, in cui in blu sono state evidenziate le aree potenzialmente colpite dall'alluvione.	53
Figura 26 - Terremoto di Haiti, Port-au-Prince. Mappa realizzata da ITHACA con l'ausilio di dati ad alta risoluzione da Google. In rosso sono evidenziati i campi di rifugio temporari al 17 Gennaio 2010.	53
Figura 27- Mappa del Bangladesh.....	54
Figura 28- Alcune delle principali cause d'alluvione in Bangladesh (http://cgz.e2bn.net)	56
Figura 29-Mappa del livello del mare in Bangladesh (Robert A. Rohde)	57
Figura 30 - Grafico che mostra le principali alluvioni avvenute tra il 1954 e il 2000 in funzione della percentuale di territorio inondata	59
Figura 31- Immagine Landsat 7. Visualizzazione della stessa area della città di Dhaka con diverse combinazioni tra bande; rispettivamente: 3-2-1 (colori naturali); 4-2-1(falsi colori); 7-4-2.....	62
Figura 32- Immagine CosmoSkymed. Particolare della città di Dhaka: a) senza filtro; b) con filtro Gamma 3x3	64
Figura 33- ROI Tool di ENVI in cui sono riportate le cinque classi con il numero di poligoni e quindi di pixel individuate per ognuna	66
Figura 34- Posizione delle ROI sull'immagine Landsat 7 con visualizzazione 7-4-2.	66
Figura 35- Classificazione supervisionata con il metodo della massima verosimiglianza, in cui si distinguono: in rosso l'urbano; in blu l'acqua; in giallo sabbia e scavi e in verde le coltivazioni e la vegetazione.	67
Figura 36- Punti di verità a terra individuati sull'immagine Landsat 7 per ciascuna classe.	68
Figura 37- Matrice di confusione per la validazione della classificazione dell'immagine Landsat 7 espressa in forma percentuale.	69

Figura 38- ROI Tool di ENVI in cui sono riportate le quattro classi con il numero di poligoni e quindi di pixel individuate per ognuna.	70
Figura 39- Posizione delle ROI sull'immagine ASTER con visualizzazione in falsi colori.	70
Figura 40- Classificazione supervisionata con il metodo della massima verosimiglianza, in cui si distinguono: in rosso l'urbano; in blu i corpi idrici e le aree inondate; in giallo sabbia e scavi e in verde le coltivazioni e la vegetazione.	72
Figura 41- Metodo Decision Tree di ENVI in cui è in primo piano la regola assegnata per la divisione dei pixel nelle due classi Water in blu e No water in bianco	74
Figura 42- Classificazione con il metodo del Decision Tree dell'immagine CosmoSkymed, in due classi: water in blu e non water in bianco.....	75
Figura 43- Il particolare delle zone umide che si trovano a Nord-Est e a Nord Ovest della capitale visto rispettivamente dall'immagine CosmoSkymed e dalla mappa tematica da essa ricavata.	76
Figura 44 - Punti di verità a terra individuati sull'immagine CosmoSkymed per la classe Water.....	77
Figura 45 - Matrice di confusione per la validazione della classificazione dell'immagine CosmoSkymed espressa in forma percentuale.	77
Figura 46 - Classificazione con il metodo del Decision Tree del subset del distretto di Sylhet dell'immagine CosmoSkymed, in due classi: water in blu e non water in bianco	78
Figura 47- Particolare dell'isolotto presente all'unione del fiume Padma con il Meghna; confronto tra Google Earth, l'immagine Landsat 7 (visualizzazione 7-4-2) e la classificazione di quest'ultima.....	79
Figura 48- Firma spettrale di un pixel vicino al fiume e localizzazione di tale punto.....	79
Figura 49- Firma spettrale di un pixel della zona urbana della città di Dhaka e localizzazione di tale punto	79

Figura 50- Immagini estratte da Google Earth: particolare di alcuni mattonifici e particolare di zona urbanizzata (periferia di Dhaka).....	80
Figura 51- Grafico delle tipologie di abitazioni in Bangladesh (dati riferiti al 2001) (http://www.cernuscoinsieme.it).....	80
Figura 52- Confronto tra la stessa area vista da Google Earth, classificazione supervisionata solo sulle bande del visibile e classificazione ottenuta considerando anche le bande del termico.....	81
Figura 53 - Confronto tra il particolare dell'immagine visualizzato con la combinazione tra bande del TIR 131211 e la classificazione ottenuta sulla medesima area.....	82
Figura 54- Confronto tra Google Earth, immagine CosmoSkymed e classificazione su di una area presa come esempio.....	82
Figura 55- Confronto tra immagine CosmoSkymed e classificazione da essa derivata. In rosso viene evidenziato l'errore che il classificatore compie destinando alla classe water la zona d'ombra del rilievo montuoso.	83
Figura 56 - Metodo Decision Tree di ENVI in cui è in primo piano la regola per discriminare le superfici in pendenza.	84
Figura 57 - Classificazione con il metodo Decision Tree della zona nel distretto di Sylhet, ottenuta dall'immagine CosmoSkymed. In blu è rappresentata la classe water, in bianco la classe no-water, nella quale sono state incluse anche le superfici con pendenza superiore al 2.5%	85
Figura 58 - Particolare nell'area di Sylhet preso rispettivamente: dall'immagine CosmoSkymed (a); dalla classificazione in cui vi è l'errore di assegnazione delle zone d'ombra alla classe water (b); dalla classificazione corretta (c).....	85
Figura 59 - Grafico a torta delle percentuali di superficie alluvionata che ha interessato le diverse categorie d'uso del suolo.....	87

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1- Divisione principale dello spettro elettromagnetico	15
Tabella 2- Schema riassuntivo di alcuni sensori passivi esistenti In rosa sono stati evidenziati i sensori passivi impiegati nel lavoro di tesi.	24
Tabella 3- Schema riassuntivo di alcuni sensori attivi esistenti. In rosa è stato evidenziato il sensore attivo impiegato nel lavoro di tesi.	25
Tabella 4- Matrice di errore in uno schema a q classi.....	31
Tabella 5- Risultati dello studio condotto sia su immagini ottiche (con risoluzione a 5m), sia sul radar (SAR) in due casi di studio. Dati espressi in percentuale di accuratezza della classificazione delle immagini.	43
Tabella 6 - Superficie di ciascuna categoria d'uso del suolo interessata dall'alluvione e le rispettive percentuali.	87

INTRODUZIONE

Il Telerilevamento è una scienza che permette di identificare, misurare e analizzare le caratteristiche qualitative e quantitative di un determinato oggetto, area o fenomeno senza entrare in contatto diretto con esso. In generale l'oggetto di studio nel Telerilevamento è il pianeta Terra in tutte le sue componenti, territorio, acqua e atmosfera, ed avendo la possibilità di operare dall'alto, a diverse distanze e in tempi differenti, questa disciplina ha introdotto una nuova filosofia di controllo e d'indagine nello studio del territorio e dei relativi problemi, permettendo di osservare fenomeni non direttamente accessibili e quindi di superare le difficoltà connesse alle campagne di misura a terra, quali grandi sforzi organizzativi, tempo e risorse non sempre disponibili.

Negli ultimi anni, in quest'ambito si è fatta molta strada in termini tecnologici e le risoluzioni, sia geometriche che spettrali, dei sensori impiegati, sono nettamente migliorate, permettendo di estendere le applicazioni del Telerilevamento anche alla gestione dei disastri naturali, dove la possibilità di indagare la superficie terrestre senza entrare in contatto con essa assume una particolare rilevanza, in considerazione della limitata accessibilità delle aree colpite da una catastrofe.

La presente tesi nasce dalla collaborazione con ITHACA (*Information Technology for Humanitarian Assistance, Cooperation and Action*), organizzazione no-profit, fondata nel novembre 2006 dal Politecnico di Torino e SiTI (Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali per l'Innovazione), la quale pone tra i suoi obiettivi cardinali quello di incrementare metodologie utili a migliorare la capacità di intervento del World Food Programme (WFP) delle Nazioni Unite, nelle fasi di allerta precoce e valutazione dei danni relativi ad eventi calamitosi.

L'impatto delle catastrofi, infatti, può essere mitigato solo con una conoscenza adeguata del territorio, che consenta di poter organizzare al meglio piani di prevenzione, tramite la valutazione e determinazione di aree di rischio e piani di attuazione e gestione dei soccorsi in maniera rapida ed adeguata.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di valutare come l'impiego dei dati telerilevati, siano essi ottici o Radar, possa essere utilizzato nella mappatura delle

alluvioni, le quali sono tra i pericoli naturali più devastanti del mondo, presentando la maggiore percentuale di morti e danni alle proprietà. Tali fenomeni si manifestano soprattutto nelle zone tropicali e monsoniche, zone spesso soggette a inondazioni dovute alle eccessive piogge improvvise. In particolare verrà analizzata la situazione del Bangladesh, il quale presenta un quadro idrologico unico ed annualmente è colpito da eventi alluvionali più o meno importanti.

La presente tesi si struttura in cinque capitoli:

Nel primo capitolo vengono richiamati i concetti fondamentali del telerilevamento, fornendo così un inquadramento generale di tale disciplina; inoltre, sempre all'interno dello stesso, vengono descritte le nozioni basilari dei vari metodi di classificazione delle immagini e viene esplicitata la validazione delle stesse.

Con il secondo capitolo, invece si è voluto sottolineare l'importanza del telerilevamento nella gestione del rischio in seguito al verificarsi di disastri calamitosi. Più nel dettaglio, avvalendosi di esempi presenti in letteratura, sono stati illustrati i metodi d'intervento, attraverso l'analisi di immagini Radar o ottiche, nel caso di frane, incendi, dispersioni di oli in mare, terremoti ed alluvioni.

Nel terzo capitolo viene approfondito il caso di studio che riguarda la nazione del Bangladesh e più precisamente le alluvioni che la colpiscono, analizzandone le tipologie e le possibili cause.

Il quarto capitolo tratta della sperimentazione sulle immagini ottiche (Landsat 7 e ASTER) e Radar (CosmoSkymed), definendo le metodologie di classificazione impiegate per l'estrazione di informazioni tematiche per la mappatura delle aree alluvionate e dei corpi idrici in generale.

Nel quinto capitolo vengono discussi i risultati ottenuti, analizzando le problematiche riscontrate nella classificazione delle immagini ed inoltre vengono esaminate le possibili interazioni tra le mappe tematiche prodotte e i dati relativi alla destinazione d'uso del suolo, in Bangladesh.

CAPITOLO 1

IL TELERILEVAMENTO E LA CLASSIFICAZIONE DELLE IMMAGINI

1.1 Generalità

Il Telerilevamento comprende quell'insieme di tecniche, strumenti e mezzi interpretativi che permettono di migliorare le capacità percettive dell'occhio e cervello umano, fornendo informazioni su oggetti posti lontano dall'osservatore (a seconda della distanza si può parlare di *Proximal Sensing* per distanze di qualche metro o di *Remote Sensing* se l'oggetto dista fino a migliaia di chilometri).

Il Telerilevamento misura l'energia elettromagnetica (Cap.1, par.1.2.1) proveniente dalle superfici in esame, cioè quantifica le alterazioni che l'oggetto impone alla radiazione, ovvero alle sue caratteristiche d'intensità, frequenza e polarizzazione.

Inoltre, senza perturbare l'oggetto osservato, presenta il vantaggio di ottenere informazioni:

- Sinottiche, cioè si ottiene un'elevata copertura spaziale e l'osservazione istantanea di grandi aree;
- Dinamiche, in quanto è possibile acquisire dati in tempi diversi di una stessa area di interesse;
- Omogenee in quanto vi è consistenza dei dati;

1.2 Principi base del Telerilevamento

1.2.1 L'energia elettromagnetica

La radiazione elettromagnetica consiste di un campo magnetico e di un campo elettrico che oscillano in maniera coordinata; la vibrazione di entrambi i campi è perpendicolare alla direzione di moto dell'onda. Entrambi i campi si propagano

attraverso lo spazio alla velocità della luce c , che può essere arrotondata a 3×10^8 m s⁻¹ (Figura 1).

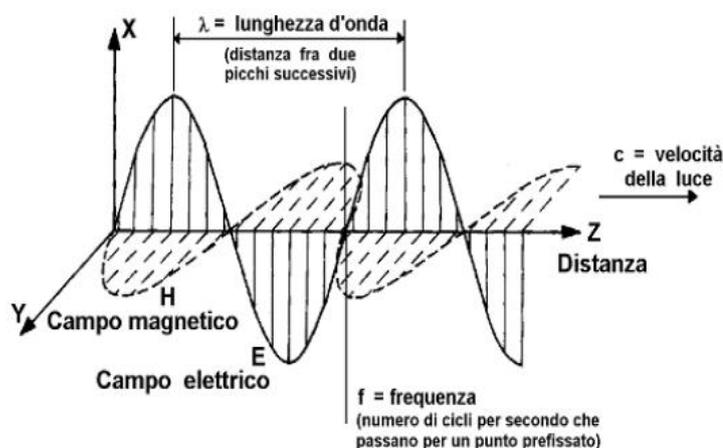


Figura 1 - Campo elettromagnetico

L'onda elettromagnetica è definita da tre parametri fondamentali:

- **Lunghezza d'onda λ** la quale esprime la distanza tra due creste d'onda consecutive. La lunghezza d'onda si misura in metri (m), o in sottomultipli del metro, come i nanometri (nm, 10^{-9} metri) o i micrometri (μm , 10^{-6} metri);
- **Frequenza ν** , cioè il numero dei picchi d'onda che passano in un punto in un certo intervallo di tempo t ; la frequenza è di solito misurata in hertz (Hz), che è equivalente ad un ciclo al secondo;
- **Ampiezza A** , che è l'altezza di ogni picco d'onda.

Il prodotto tra la lunghezza d'onda e la frequenza è costante e rappresenta la velocità di propagazione dell'onda:

$$c = \lambda \cdot \nu$$

In questa equazione, c è la velocità della luce, λ è la lunghezza d'onda (m), e ν è la frequenza (cicli al secondo, Hz). Più piccola è la lunghezza d'onda, più alta è la frequenza. Viceversa, maggiore è la lunghezza d'onda, più bassa è la frequenza. (Figura 2)

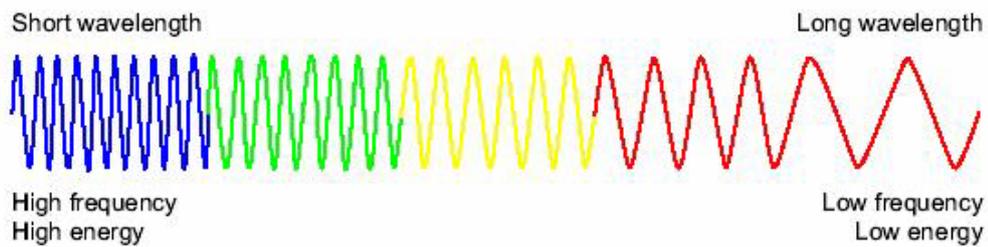


Figura 2- Relazioni tra lunghezza d'onda, frequenza ed energia

1.2.2 Lo spettro elettromagnetico

Lo spettro elettromagnetico è una distribuzione monodimensionale continua dell' energia elettromagnetica ordinata per lunghezze d'onda λ crescenti. Anche se la realtà fisica dello spettro elettromagnetico nella distribuzione dei vari tipi di energia è a tutti gli effetti continua, è comodo per motivi pratici ed anche teorici suddividerlo in diversi *intervalli* o *bande spettrali* (Brivio et al., 2006). Si definisce in questo modo lo *schema dello spettro elettromagnetico* del quale è riportata in Tabella 1e in Figura 3 la principale suddivisione.

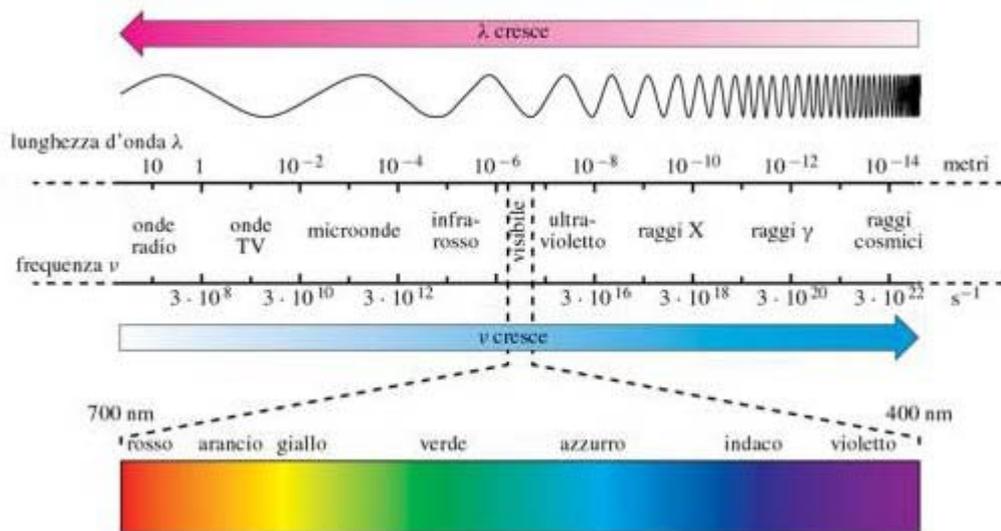


Figura 3- Spettro elettromagnetico con particolare del visibile

Il Telerilevamento si occupa prevalentemente delle bande delle microonde, dell'infrarosso (vicino e termico), del visibile e, anche se più raramente, dell'ultravioletto (Figura 4).

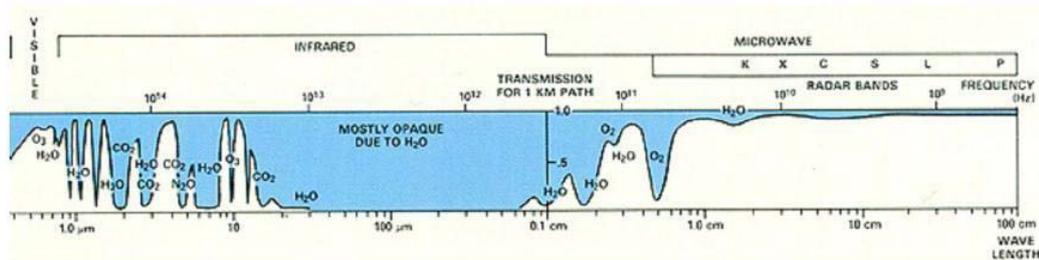


Figura 4- Bande maggiormente utilizzate nel telerilevamento

Le caratteristiche principali di queste bande sono elencate di seguito:

- *Ultravioletto*: Le frequenze vanno da 10^{15} a 10^{17} Hz. I raggi ultravioletti hanno una propagazione simile a quella della luce, ma subiscono una forte attenuazione atmosferica; sono prevalentemente usati per la spettrometria.
- *Visibile*: frequenze tra 4×10^{14} e 7×10^{14} Hz. La propagazione è di tipo ottico; l'attenuazione in atmosfera è più forte alle lunghezze d'onda più corte ma di solito accettabile, mentre il rumore cresce con la frequenza. La regione visibile dello spettro è comunemente chiamata "luce" e occupa una porzione relativamente piccola dello spettro elettromagnetico. È importante notare come questa sia l'unica parte dello spettro a cui sia possibile associare il concetto di colore (Figura 3).
- *Infrarosso*: si distingue in:
 - *IR VICINO* o *RIFLESSO* il quale ha propagazione di tipo ottico, prevalentemente emesso da sorgente esterna e riflesso dal corpo osservato;
 - *IR TERMICO* o *EMESSO*, il quale è prevalentemente emesso per irraggiamento spontaneo del corpo osservato.

L'infrarosso vicino (NIR) si comporta come la radiazione visibile, viene riflesso dalla superficie terrestre e può essere rilevato da speciali pellicole fotografiche. L'infrarosso medio o termico viene emesso in quantità significativa anche dalla superficie terrestre e per questo viene anche detto infrarosso emesso. Gli impieghi più diffusi sono di classificazione per l'IR vicino, di studio dell'ambiente e meteorologici per l'IR termico, inoltre dà informazioni relative alla temperatura della superficie che può essere messa in relazione con la composizione dei minerali delle rocce o con la condizione della vegetazione.

- *Microonde*: sono ampiamente utilizzate per il telerilevamento, sia attivo (SAR, InSAR,..) sia passivo (radiometri). Le microonde possono dare informazioni circa la rugosità delle superfici e le proprietà di queste ultime come per esempio il contenuto di acqua (Trianni, 2006).

Tabella 1- Divisione principale dello spettro elettromagnetico

REGIONE DELLO SPETTRO	LIMITI
Raggi gamma	< 0.03 nm
Raggi X	0.03÷290 nm
Ultravioletto (UV)	0.29÷0.40 µm
UVB	0.29÷0.32 µm
UVA	0.32÷0.40 µm
Visibile	0.40÷0.72 µm
Vicino infrarosso	0.72÷1.30 µm
Medio Infrarosso	1.30÷3 µm
Lontano infrarosso(termico)	3÷1000µm
Microonde	1mm÷30cm
Onde radio	≥30 cm

1.2.3 Interazioni con l'atmosfera e con la superficie terrestre

La radiazione solare, prima di raggiungere la superficie terrestre percorre l'atmosfera: in questo passaggio una parte dell'energia è riflessa verso l'alto; un'altra parte viene invece assorbita e poi riemessa in tutte le direzioni come radiazione termica; una parte viene diffusa. L'energia elettromagnetica riflessa e parte di quella diffusa trasporta le informazioni registrate dai radiometri e dai sensori utilizzati nel telerilevamento.

Le interazioni atmosferiche della radiazione elettromagnetica possono essere rilevanti o trascurabili ai fini dei rilievi spettrali a seconda del percorso che l'onda deve percorrere prima di essere catturata dal sensore. Maggiore è tale percorso, maggiori sono le influenze atmosferiche sulla radianza registrata dal sensore: se il sensore è montato su un aereo che vola a bassa quota o se le misure vengono effettuate a terra, gli effetti dell'atmosfera nella radiazione riflessa sono minimi; al

contrario i sensori montati su satellite ne sono molto influenzati, perché la radiazione riflessa deve attraversarla completamente prima di raggiungerli.

L'atmosfera modifica la radiazione utile in tre modi differenti:

- Diffusione (scattering);
- Assorbimento atmosferico;
- Rifrazione.

La radiazione elettromagnetica che raggiunge la superficie terrestre interagisce con essa attraverso processi di:

- Riflessione;
- Trasmissione
- Assorbimento terrestre.

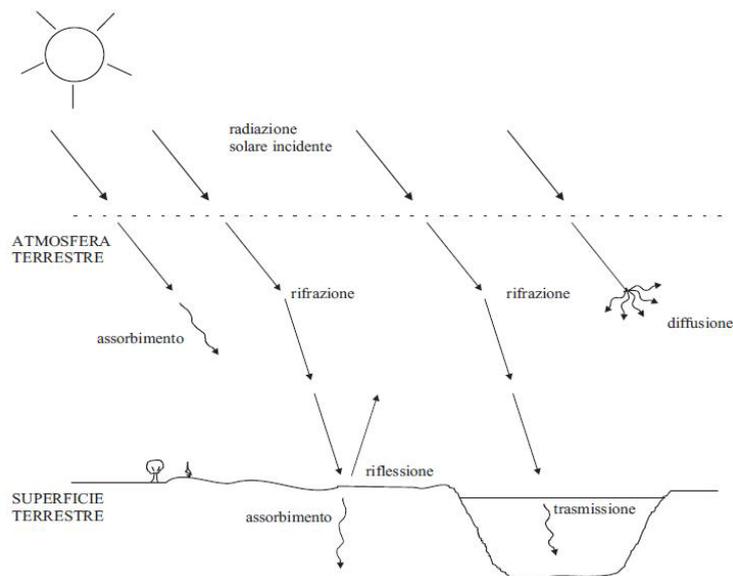


Figura 5- Interazioni raggio elettromagnetico-atmosfera; raggio elettromagnetico-superficie terrestre

La **diffusione** si verifica per interazione con le particelle fini o gassose dell'atmosfera e distribuisce in tutte le direzioni la radiazione intercettata. La diffusione avviene in prevalenza per le radiazioni a lunghezza d'onda più bassa vale a dire per quelle nel campo del violetto e del blu.

La **rifrazione** avviene quando il fascio di luce attraversa due mezzi differenti in grado di trasmettere la radiazione. Nell'atmosfera questo fenomeno avviene al passaggio dei diversi strati atmosferici caratterizzati da umidità e temperature differenti. Tali variazioni influenzano la densità degli strati atmosferici causando una curvatura del raggio che li attraversa. Questo fenomeno è osservabile d'estate

quando è percepibile un tremolio degli oggetti posti a distanza, dovuto al passaggio della luce vicino a superfici molto calde, come ad esempio il manto stradale.

L'**assorbimento atmosferico** si verifica per l'interazione della radiazione elettromagnetica con i gas presenti nell'atmosfera, quali ozono, ossigeno, anidride carbonica e vapor acqueo. Questi gas assorbono l'energia contenuta nella radiazione luminosa per poi riemetterla sotto forma di energia radiante con lunghezza d'onda maggiore. L'assorbimento da parte dei gas si verifica quando una radiazione, entra in contatto con esse, così che l'energia trasportata dall'onda si trasforma in energia vibrazionale o rotazionale dei legami atomici.

La **riflessione** avviene quando un raggio luminoso incide su una superficie non trasparente e viene diretto in un'altra direzione. Il tipo di riflessione dipende dalle dimensioni delle irregolarità della superficie: se essa è liscia in relazione in relazione alla lunghezza d'onda, si verifica il fenomeno della *riflessione speculare* in cui tutta la radiazione incidente viene riflessa in un'unica direzione, se la superficie è invece irregolare si comporta come un *riflettore isotropo* (o diffuso) e la luce viene riflessa in modo diffuso.

La **trasmissione** avviene quando la radiazione passa attraverso un mezzo senza subire una significativa attenuazione. La trasmissione dipende dalla lunghezza d'onda: esistono corpi opachi per certe lunghezze d'onda trasparenti per altre.

L'**assorbimento terrestre** della radiazione elettromagnetica può avvenire in base alle caratteristiche chimico-fisiche dei corpi che vi si trovano. Ad esempio la vegetazione assorbe gran parte della radiazione incidente della banda del rosso, per poi riemetterla sotto forma di energia termica a lunghezza d'onda maggiore. In natura ogni oggetto ha un comportamento spettrale caratteristico. La **firma spettrale** (Figura 6) di ogni corpo permette di ottenere informazioni sulle caratteristiche delle superfici analizzate. (Chiarato, 2004)

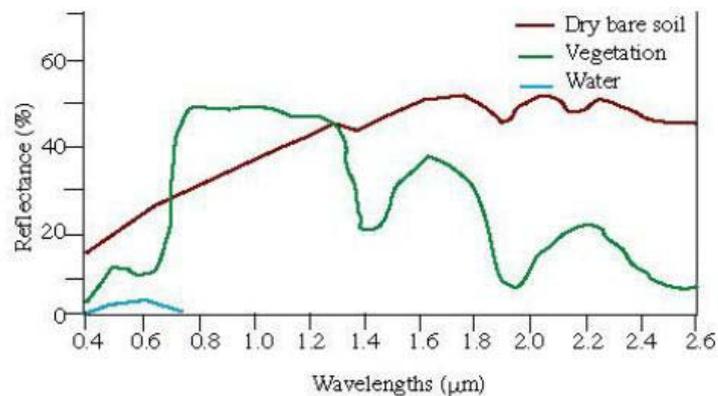


Figura 6 - Firme spettrali di vegetazione verde, del suolo e dell'acqua

1.2.3.1 La firma spettrale dell'acqua

Per ogni materiale può essere stabilita la firma spettrale, che mostra la frazione della radiazione incidente riflessa come funzione della lunghezza d'onda. La curva di riflettanza di una superficie varia molto in funzione sia delle condizioni ambientali, quali periodo dell'anno, condizione fisica e chimica della superficie, e sia delle condizioni di ripresa come geometria sorgente- superficie- sensore. È possibile disegnare delle curve di riflettanza media che, pur avendo valore indicativo, possono dare delle informazioni importanti sul comportamento delle superfici in esame (Trianni 2006).

Se paragonata a quelle di vegetazione e suolo (Figura 6), si nota subito che l'acqua ha una riflettanza più bassa. La vegetazione può riflettere fino al 50%, il suolo fino al 30-40%, mentre l'acqua riflette al massimo il 10% della radiazione incidente. L'acqua riflette l'energia elettromagnetica nel visibile fino al vicino infrarosso. Oltre 1200 nm tutta l'energia viene assorbita. La Figura 7 mostra l'andamento di alcune curve di riflettanza per diversi tipi di acqua. La riflettanza più alta è data dall'acqua fangosa, e da acqua contenente piante che hanno un picco della riflessione della clorofilla alla lunghezza d'onda del verde. Tuttavia, tale riflettanza apparente nasce dalla riflessione dei corpi contenuti nell'acqua piuttosto che dall'acqua stessa.

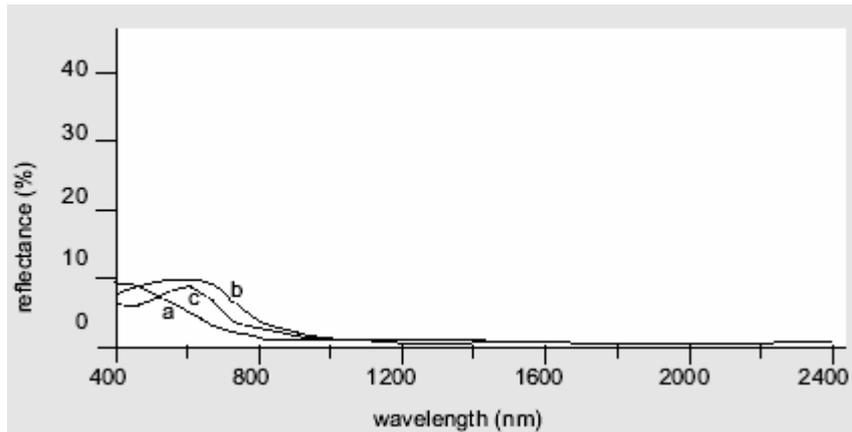


Figura 7- Effetti tipici della clorofilla e dei sedimenti sulla riflettanza dell'acqua; (a) acque oceaniche, (b) acqua torbida, (c) acqua con clorofilla

1.2.4 Il concetto di risoluzione

Ogni dispositivo sensoriale per attività di telerilevamento, è caratterizzato da quattro proprietà:

- *risoluzione spaziale o geometrica;*
- *risoluzione radiometrica;*
- *risoluzione spettrale;*
- *risoluzione temporale.*

Nei sensori ottici passivi, la **risoluzione spaziale**, è l'area minima sul terreno esplorata dall'apparato di ripresa (da una data altezza e ad un dato istante) focalizzata sull'elemento sensoriale unitario; corrisponde alla dimensione finita dell'elemento di superficie (*pixel*) riconoscibile in un'immagine o alla distanza minima entro la quale due oggetti appaiono distinguibili nell'immagine. Per alcuni strumenti di telerilevamento, la distanza minima tra gli oggetti che devono essere visualizzati e la quota orbitale (o altitudine di volo della piattaforma) gioca un ruolo importante nel determinare il massimo dettaglio delle informazioni ottenute e quindi l'area totale minima visualizzata dal sensore. Sistemi di rilevamento a bordo di piattaforme molto lontane dagli oggetti da osservare, normalmente focalizzano un'area minima più grande e per questo non possono ottenere un grande dettaglio. Infatti, il dettaglio di un'immagine dipende dalla risoluzione spaziale del sensore connessa prima di tutto all'istantaneo campo di vista (*Instantaneous Field of View- IFOV*) del sottosistema ottico (specchio/telescopio) che effettua l'osservazione della scena. L'IFOV è il cono

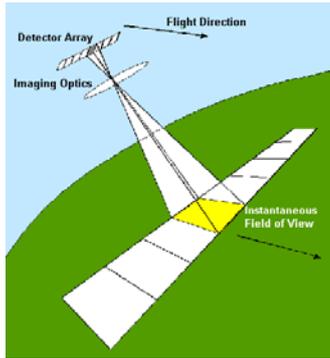


Figura 8- IFOV

angolare di visibilità del sistema sensoriale che determina l'area della superficie terrestre vista ad una data altezza in un particolare momento (Figura 8). La dimensione dell'area osservata è determinata moltiplicando l'IFOV per la distanza dal terreno al sensore, quest'area è detta cella di risoluzione e determina la risoluzione spaziale massima del sensore.

Affinché un oggetto omogeneo sia osservabile la sua dimensione deve essere uguale o più grande della cella di risoluzione, se al contrario è più piccolo di questa, non può essere identificato, per cui sarà registrata la luminosità media di tutti gli oggetti in questa cella di risoluzione. I satelliti commerciali forniscono immagini con risoluzioni che variano da 50 cm (GeoEye) a diversi km (METEOSAT) (Figura 9).



Figura 9- Stessa area osservata a diverse risoluzioni

Per **risoluzione radiometrica** si intende la minima energia o potenza in grado di stimolare l'elemento sensibile affinché produca un segnale elettrico rilevabile all'apparecchiatura. Spesso nelle specifiche tecniche di sistemi di scansione all'infrarosso termico, si legge che la risoluzione radiometrica. è espressa in °C: ciò sta a significare che lo strumento è in grado di discriminare due superfici purché fra queste sussista una differenza di temperatura tale per cui le due potenze radianti associate sono discernibili. Per tale aspetto, si dice infatti che tale risoluzione. rappresenta anche la minima differenza di intensità che un sensore può rilevare tra due valori di energia radiante (Trianni, 2006). Le caratteristiche radiometriche descrivono il contenuto informativo di un'immagine; migliore è la risoluzione radiometrica di un sensore, più sensibilità si ottiene nella registrazione di piccole differenze nell'energia riflessa o emessa. Quindi, la risoluzione

radiometrica, può essere definita come il numero di livelli discreti in cui può venire campionato un segnale. I dati di un'immagine sono rappresentati da numeri digitali positivi che variano da 0 a una potenza di 2, questo *range* corrisponde al numero di *bit* usati per codificare i numeri nel formato binario. Ciascun *bit* registra un esponente della potenza di due; il massimo numero di livelli di luminosità disponibili dipende dal numero di *bit* usati per rappresentare l'energia registrata:

sensore a 8 *bit* → valori digitali disponibili $2^8 = 256$

sensore a 4 *bit* → valori digitali disponibili $2^4 = 16$

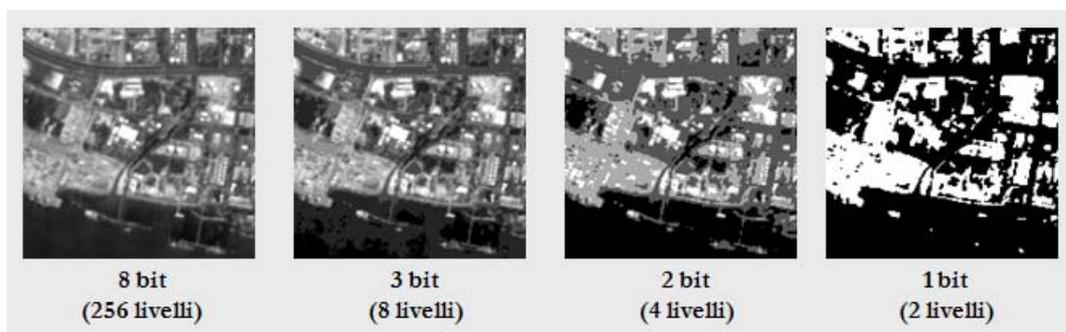


Figura 10- Stessa scena ripresa con diversa risoluzione radiometrica

I dati in una immagine sono generalmente visualizzate in un intervallo di toni di grigio con il nero che rappresenta il minimo digitale 0 e il bianco che rappresenta il massimo digitale (255 a 8 *bit*). Effettuando un confronto tra un'immagine a 2 *bit* ed una a 8 *bit* si può notare che esiste una notevole differenza nel livello di dettaglio individuabile in funzione della risoluzione radiometrica; più alto è il numero di livelli di grigio, migliore è la risoluzione radiometrica (Figura 10).

La **risoluzione spettrale** è l'ampiezza delle bande spettrali rilevate dal sensore cioè il minimo intervallo tra le lunghezze d'onda medie di due bande spettrali che un sensore può separare; migliore è la risoluzione spettrale più sottile è l'intervallo di lunghezze d'onda per una particolare banda. Le pellicole in bianco e nero registrano le lunghezze d'onda che si estendono su tutta la porzione del visibile dello spettro elettromagnetico non effettuando alcuna discretizzazione della stessa riflettanza ma acquisendola nella sua interezza (funzione integrale) e avendo come naturale conseguenza l'ottenimento di un prodotto a bassa risoluzione spettrale. Anche le pellicole a colori sono sensibili all'energia riflessa

dalla porzione visibile dello spettro, ma hanno una risoluzione spettrale più alta per cui sono sensibili all'energia riflessa singolarmente nel blu, nel verde e nel rosso; possono quindi rappresentare oggetti di diversi colori in funzione della loro riflettanza in ciascuno di questi intervalli di lunghezza d'onda. Molti sistemi di telerilevamento registrano l'energia di intervalli separati di lunghezza d'onda a diverse risoluzioni spettrali, in questo caso i sensori vengono detti *multispettrali*. Esistono anche sensori multi spettrali avanzati chiamati *iperspettrali*, che registrano centinaia di bande; la loro elevata risoluzione spettrale rende possibile la discriminazione tra differenti oggetti sulla base della loro risposta spettrale in ciascuna delle bande.

La **risoluzione temporale** è il tempo che intercorre tra rilevamenti successivi della stessa area (*frame*) che, generalmente, è dell'ordine di diversi giorni. Quindi la risoluzione temporale assoluta di un sistema di telerilevamento per riprendere la stessa area con lo stesso angolo di vista è uguale a questo periodo. Comunque, in virtù del fatto che c'è una certa sovrapposizione (*overlap*) dell'ampiezza di ripresa di orbite adiacenti per la maggior parte dei satelliti e che questa sovrapposizione aumenta all'aumentare della latitudine, alcune aree della terra possono essere riprese più frequentemente. Inoltre, alcuni satelliti hanno la capacità di orientare i loro sistemi di rilevamento per riprendere la stessa area in passaggi differenti con intervalli temporali più ristretti. Quindi, la risoluzione temporale di un sensore dipende da una varietà di fattori tra cui le caratteristiche della missione satellitare (quota orbitale e velocità), del sistema sensoriale, (ridondanza del sistema e *tilting* dell'apparato sensoriale per la sovrapposizione dell'ampiezza di ripresa) e la latitudine geografica in cui viene effettuata la ripresa (Bottini, 2001).

1.3 I sensori e le principali missioni satellitari

Come abbiamo visto nei paragrafi precedenti, il telerilevamento studia la radiazione elettromagnetica riflessa o emessa da un oggetto mediante strumenti detti "sensori remoti", i quali possono essere collocati su piattaforme terrestri, palloni, veicoli aerei e spaziali. I sensori remoti registrano le radiazioni elettromagnetiche che viaggiano a circa la velocità della luce dalla sorgente al sensore stesso, direttamente attraverso il vuoto o indirettamente mediante la

riflessione o la ri-radiazione. La radiazione elettromagnetica rappresenta un collegamento ad alta velocità tra il sensore ed il fenomeno in esame; variazioni nelle caratteristiche delle radiazioni elettromagnetiche diventano fonte di una grande quantità di dati, che consentono di interpretare e di ricavare importanti informazioni sui diversi aspetti del fenomeno investigato.

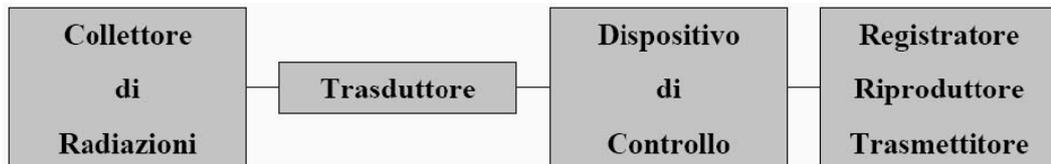


Figura 11- Schema principale di un sensore

I sensori remoti si dividono in sensori passivi e attivi (Figura 12); entrambe le tipologie sono tipicamente caratterizzate dal tipo di informazione che si vuole ottenere: spettrale, spaziale e di intensità.

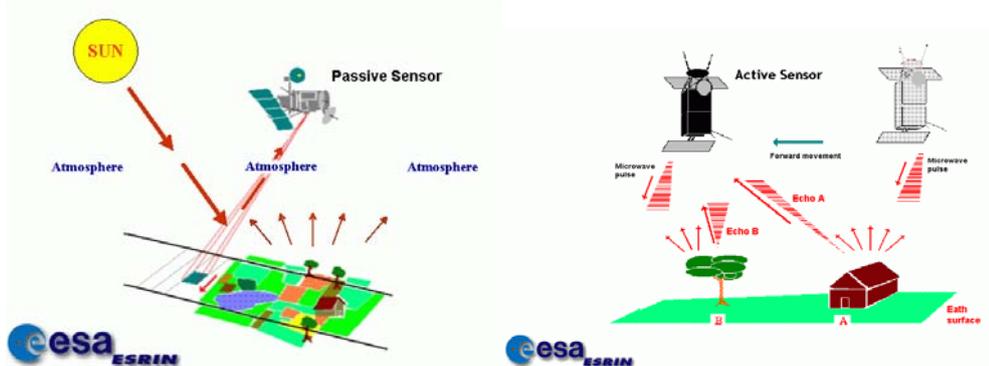


Figura 12- Confronto tra sensori attivi e passivi

Di seguito è riportata un breve descrizione della due tipologie di sensori:

- **Sensori passivi:** rilevano la radiazione elettromagnetica riflessa o emessa da fonti naturali, come ad esempio il Sole. L'energia riflessa del sole può essere misurata solo di giorno, quando il sole illumina l'oggetto in osservazione (è il caso delle lunghezze d'onda nel campo visibile), mentre l'energia emessa, come l'infrarosso termico, può essere misurata sia di giorno che di notte; Tra i satelliti che utilizzano questo tipo di rilevazione vi sono i satelliti della costellazione Landsat, per i quali attualmente sono in funzione i satelliti di seconda generazione dotati non più del MSS, ma di un sensore TM (Thematic Mapper) con una risoluzione spaziale migliore (30 metri anziché 80 per il visibile, 120 m per la banda termica) e spettrale (7 bande invece di 4); inoltre il Landsat 7, il satellite di più recente lancio, è fornito della versione più avanzata del TM, l'ETM+ (Enhanced Thematic Mapper plus), dotato di 8 bande di cui quella termica con risoluzione 60 m. Attorno a questa costellazione di satelliti, storicamente la prima e più importante, ne sono nate altre più avanzate e con maggiore

risoluzione geometrica, tra cui quelle dei satelliti Spot, Ikonos, Quickbird e WorldView. Uno schema riassuntivo dei principali sensori passivi è riportato in Tabella 2.

Tabella 2- Schema riassuntivo di alcuni sensori passivi esistenti In rosa sono stati evidenziati i sensori passivi impiegati nel lavoro di tesi.

Sensore	Proprietà	Risoluzione temporale	Risoluzione spaziale	N° canali	Anno di lancio
Landsat5	Stati Uniti	16 giorni	82 m (MSS)	4(multisp.)	1984
			30 m (TM)	6(multisp.)	
			120 m (TM)	1(multisp.)	
SPOT 2	Francia	26 giorni	20 m	3(multisp.)	1990
			10 m	1(pan.)	
IRS 1B	India	24 giorni	72.5 m	4(multisp)	1991
			36.25 m	4(multisp)	
IRS 1C	India	24 giorni	188 m	2(multisp)	1995
			23 m	3(multisp)	
			70 m	1(multisp)	
			5.8 m	1(pan)	
IRS 1D	India	24 giorni	188 m	2(multisp)	1997
			23 m	3(multisp)	
			70 m	1(multisp)	
			5.8 m	1(pan)	
SPOT 4	Francia	26 giorni	20 m	4(multisp)	1998
			10 m	4(multisp)	
			1100 m	1 (pan)	
Landsat7	Stati Uniti D'America	16 giorni	30 m	6(multisp)	1999
			60 m	1(multisp)	
			15 m	1 (pan)	
IKONOS	Stati Uniti d'America	3 giorni	4 m	4(multisp)	1999
			1 m	pan	
QuickBird	Digital Globe	1-5 giorni	2.8 m	multisp	2001
			0.68 m	pan	
EOS- MODIS	Nasa- Stati Uniti	1 giorno	250 m	1-2	1999
			500 m	3-7	
			1000 m	8-36	
EOS- ASTER	Nasa- Stati Uniti	16 giorni	15m	VNIR	1999
			30m	SWIR	
			90m	TIR	
NOAA- AVHRR	Stati Uniti	12 ore	1100 m(al nadir)	5	1998

- **Sensori attivi:** rilevano la risposta riflessa da un oggetto irradato da una fonte di energia generata artificialmente da loro stessi. Per questo motivo i sensori attivi devono essere in grado di emettere una considerevole quantità di energia, sufficiente ad illuminare il bersaglio. La radiazione emessa raggiunge l'oggetto in osservazione e la sua frazione riflessa viene rilevata e misurata dal sensore, come nel caso dei radar o dei lidar. A differenza dei sensori ottici, che attualmente sono in buona parte gestiti da società ed enti privati, sensori radar sono stati installati prevalentemente su satelliti mandati in orbita da agenzie governative, come nel caso dei satelliti ERS-1, ERS-2 ed ENVISAT, lanciati dall'Agenzia Spaziale Europea, e della costellazione Cosmo-Skymed, promossa dall'Agenzia Spaziale Italiana.

Tabella 3- Schema riassuntivo di alcuni sensori attivi esistenti. In rosa è stato evidenziato il sensore attivo impiegato nel lavoro di tesi.

Satellite	Proprietà	Risoluzione Temporale	Risoluzione Spaziale	Banda	Operatività
ERSI-2	Agenzia Spaziale Europea	35 giorni	20x5 m	C	1992-2001
ENVISAT	Agenzia Spaziale Europea	35 giorni	20x5 m	C	2003- ad oggi
RADARSAT 1	Agenzia Spaziale Canadese	24 giorni	Fino a 10x5 m	C	1995-ad oggi (dal 2003 sul territorio italiano)
RADARSAT 2	Agenzia Spaziale Canadese	24 giorni	Fino a 10x5 m	C	2008 ad oggi
TerraSAR X	Agenzia Spaziale Tedesca	11 giorni	Fino a 1x1 m	X	2008 ad oggi
CosmoSkymed	Agenzia Spaziale Italiana	1-4-8 giorni	Fino a 1x1 m	X	2008 ad oggi

Le immagini prodotte dai sensori permettono di realizzare delle mappe tematiche del territorio, e quindi di valutare in maniera quantitativa il territorio stesso, e controllare gli effetti che vengono prodotti sull'ambiente da interventi antropici o meno.

1.4 La classificazione delle immagini

I dati telerilevati derivano dal trasferimento delle informazioni dal mondo reale ad una realtà oggettiva che viene rappresentata nelle immagini. I processi che permettono d'interpretare tali dati possono essere distinti in due tipologie: il processo d'interpretazione qualitativo tipico della mente umana e il processo di interpretazione quantitativo tipico delle macchine.

Il primo, fa riferimento sostanzialmente alla disciplina della foto-interpretazione, ed è interamente realizzato da un esperto analista che attua un processo decisionale ad alto livello servendosi delle informazioni spaziali a disposizione (forma, dimensione e tessitura), ma risulta limitato nell'analisi multispettrale e nella distinzione dei livelli di grigio e dei toni di colore; in quanto produce, in genere, una scarsa accuratezza nel calcolo di dati metrici. È un metodo soggettivo, concreto, qualitativo.

Il secondo, legato all'interpretazione automatica, è caratterizzato da un processo decisionale a basso livello, una limitata iterazione con l'operatore umano, non eccelle nella comprensione delle informazioni spettrali, ma consente una buona analisi multispettrale, un'indagine quantitativa di tutti i livelli di grigio o dei toni di colore, una valutazione precisa delle dimensioni, ed è un metodo oggettivo, astratto e quantitativo.

L'analisi di un'immagine è finalizzata ad estrarre il contenuto informativo in modo comprensibile all'utente finale. Una delle informazioni richieste può essere un'identificazione delle categorie o classi presenti nell'immagine oggetto di studio. La *pattern recognition*, una sottoarea dell'apprendimento automatico, cerca di emulare il processo tipico della mente umana; tale disciplina studia sistemi per il riconoscimento in automatico di oggetti (identificazione di *pattern* ovvero modelli teorici) all'interno dei dati al fine della classificazione.

Nel processo di classificazione delle immagini un operatore umano istruisce il calcolatore ad effettuare una interpretazione delle stesse immagini sulla base di certe condizioni definite dall'operatore stesso. La classificazione delle immagini è una di quelle tecniche che rientrano nell'ambito dell'interpretazione delle immagini digitali.

In pratica la classificazione delle immagini consiste nel processo che permette di ottenere **mappe tematiche** del territorio osservato, ossia decidere per ogni pixel cosa esso rappresenta in termini di copertura o di uso del terreno.

1.4.1 Metodi di classificazione automatica

Andando a considerare a quale livello interviene l'esperto a fornire il proprio contributo di informazione, è possibile suddividere i metodi di classificazione in (Figura 13) :

- *Classificazione guidata o supervisionata* in cui l'esperto definisce a priori le classi di informazione (legenda) e riconosce un certo numero di pixel come prototipi per ognuna delle classi, detti dati di training;
- *Classificazione non guidata o unsupervised* in cui l'esperto interviene a posteriori per assegnare le etichette, dopo che il computer ha suddiviso secondo una qualche regola di decisione (clustering) i dati di un certo numero di classi spettrali. (Brivio et al., 2006)

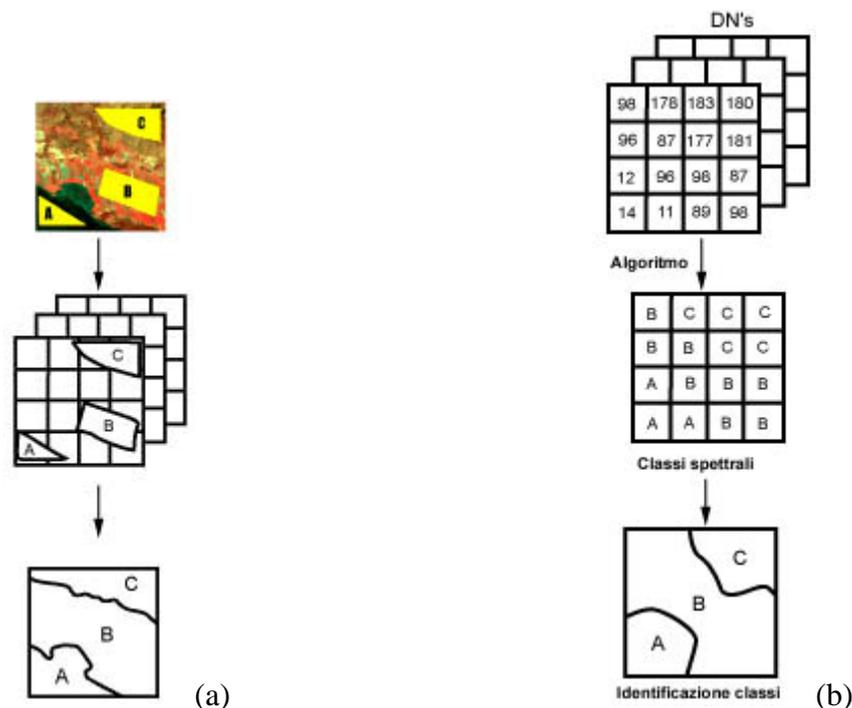


Figura 13- Classificazione supervisionata (a) e classificazione non supervisionata (b)

1.4.2 Classificazione supervisionata

La classificazione supervisionata è la tecnica più utilizzata per un'analisi quantitativa delle immagini da Telerilevamento. Tale processo presuppone la conoscenza della realtà a terra per un certo numero di pixel.

La classificazione guidata può essere schematizzata nei seguenti passi:

1. **definizione della legenda:** fase in cui deve essere specificato l'insieme delle classi di copertura presenti sul terreno da individuare sull'immagine;
2. **scelta dei training samples:** per ogni classe da identificare devono essere individuati dei pixel per l'addestramento del programma che eseguirà la classificazione. Tali pixel dovranno essere in numero sufficiente per garantire risultati ragionevoli, trovarsi in aree omogenee e trovarsi in zone diverse dell'immagine per meglio garantire il risultato del prototipo;
3. **selezione delle caratteristiche:** vanno identificate le componenti del feature space tra tutte quelle disponibili all'interno dei dati di training, è quindi opportuno costruire lo spazio delle caratteristiche in modo che esso includa solo l'informazione importante per la classificazione, senza informazioni ridondanti;
4. **funzioni di decisione:** ad ogni classe viene associata regola di decisione per suddividere il feature space in regioni corrispondenti alle classi da assegnare;
5. **applicazione dell'algoritmo:** tramite un processo automatico tutti i pixel dell'immagine vengono classificati secondo le regole di decisione, il risultato finale è una mappa tematica in cui compaiono le classi richieste. Gli algoritmi maggiormente impiegati sono il metodo della minima distanza dalla media, metodo a massima verosimiglianza, metodo della distanza angolare spettrale e l'algoritmo del parallelepipedo;
6. **validazione dei risultati:** si valuta l'accuratezza della mappa tramite un confronto del risultato con un insieme di pixel noti detti ground truth; il grado di confidenza dei risultati è rappresentato nella matrice di confusione.

1.4.3 Classificazione non supervisionata (unsupervised)

La peculiarità principale, di questo tipo di classificazione è che le classi vengono identificate da cluster compatti e ben distinguibili tra loro senza conoscere a priori l'entità della loro natura; l'intero spazio delle caratteristiche viene suddiviso in classi spettrali adoperando criteri di prossimità o similarità. Soltanto una volta terminato il processo d'identificazione delle classi spettrali l'analista assocerà a queste le classi tematiche in relazione alla conoscenza del territorio.

Tale approccio si basa sull'ipotesi fondamentale che a oggetti tra loro simili debbano corrispondere risposte spettrali simili e questo si riflette sul fatto che nello spazio delle caratteristiche i valori associati ai pixel dell'immagine tendono a formare delle nuvole o gruppi detti cluster.

1.4.4 Valutazione dell'accuratezza

Le mappe tematiche prodotte in seguito alla classificazione delle immagini devono essere sottoposte ad una rigorosa valutazione statistica di accuratezza prima che possano essere impiegate nello scopo per il quale sono state prodotte.

L'accuratezza di una mappa tematica è definita come la misura dell'accordo tra la mappa ottenuta dalla classificazione e un riferimento che si assume come verità, quanto più la mappa tematica si avvicina al riferimento assunto tanto più la classificazione è accurata (Brivio et al., 2006). Il concetto di accuratezza non è legato alla precisione della classificazione, infatti con quest'ultimo termine viene indicato il livello di dettaglio della classificazione, quando la precisione richiesta è maggiore aumentano le possibilità di errore e quindi ci si può aspettare un'accuratezza inferiore.

1.4.4.1 Accuratezza ed errori di una mappa tematica

L'errore che può essere commesso durante il processo di classificazione è quello di assegnare un pixel ad una categoria o classe diversa da quella a cui appartiene.

I principali tipi d'informazione sugli errori che si vogliono estrarre dall'analisi della accuratezza sono:

- natura, la quale riguarda le classi che vengono confuse dalla mappa;

- frequenza che indica quanto spesso si verificano situazioni di confusione tra la mappa e il riferimento assunto;
- grandezza dell'errore che varia in base al tipo di disaccordo, nel senso che alcuni errori possono essere più gravi di altri;
- sorgente, la quale può derivare da un complesso di fattori che interagiscono fra loro, quali struttura del paesaggio, risoluzione del sensore, algoritmi di pre-elaborazione e la procedura di classificazione.

Esistono due metodologie per valutare l'accuratezza: *non-site-specific* e *site-specific*. Il primo metodo esegue una valutazione confrontando i valori delle aree assegnate alle classi nelle due immagini; è un metodo elementare che non considera la localizzazione spaziale delle classi e questo limite può causare gravi errori di valutazione. L'accuratezza *site-specific* opera confrontando individualmente pixel per pixel delle due immagini, è un procedimento oneroso, ma garantisce una stima dell'accuratezza affidabile in quanto è considerata la localizzazione degli errori.

Idealmente questo procedimento andrebbe applicato sull'intera immagine, ma nella realtà dei fatti è complesso, quindi è applicato su alcune aree campione dette *test samples* che non devono assolutamente essere coincidenti ai training sites, perché significherebbe valutare la classificazione sulle informazioni utilizzate a produrla.

1.4.4.2 La matrice di errore

La matrice di errore o matrice di confusione è una matrice quadrata in cui vengono riportati i risultati dal confronto tra la mappa tematica prodotto in seguito alla classificazione e la verità di riferimento. Ha dimensione $q \times q$, dove q è il numero delle classi o categorie nella mappa e le colonne rappresentano i dati di riferimento (verità), mentre le righe rappresentano i dati della classificazione (Tabella 4).

Tabella 4- Matrice di errore in uno schema a q classi

	Classi	Dati di riferimento (colonne)				Totali per classe nella mappa
		1	2	....	q	
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}	

La classificazione ideale è rappresentata da una matrice d'errore che non presenta elementi fuori dalla diagonale. La matrice d'errore oltre a fornire indicazioni riguardo la corretta classificazione, riporta dettagliate informazioni sugli errori e sulla loro distribuzione.

CAPITOLO 2

IL TELERILEVAMENTO NELLA GESTIONE DEI DISASTRI AMBIENTALI E LE ORGANIZZAZIONI INTERNAZIONALI

2.1 Il telerilevamento come supporto nella gestione dei disastri ambientali: generalità

La peculiarità dei satelliti è certamente la possibilità di osservare la superficie terrestre senza limiti, terra o mare che sia: quindi per monitorare una zona lontana ed estesa per migliaia di chilometri nulla si rivela più adatto. Infatti, il poter guardare dall'alto e con un quadro d'insieme rende subito evidente la presenza di qualche anomalia o modificazione nel confronto con i dati precedenti.

La corrispondente attività svolta con mezzi terrestri renderebbe impossibile il completo controllo della zona e costerebbe una cifra esorbitante in personale, attrezzature e mezzi di trasporto, senza parlare poi del fatto che l'omogeneità dei dati raccolti sarebbe inficiata dalla presenza di persone diverse addette alla rilevazione.

Dal lancio del primo satellite della serie Landsat, avvenuto nel 1972, si è fatta molta strada in termini tecnologici e le risoluzioni dei sensori impiegati nel telerilevamento, sono nettamente migliorate, permettendo di estendere le applicazioni di questa disciplina anche nella gestione dei disastri naturali (Nirupama & Simonovic, 2002). L'impatto delle catastrofi, infatti può essere mitigato solo con una conoscenza adeguata del territorio, in modo da poter organizzare al meglio sia piani di prevenzione tramite la valutazione e determinazione di aree di rischio, con la conseguente pianificazione territoriale,

sia attraverso piani di avvertimento, attuazione e gestione dei soccorsi in maniera rapida ed adeguata.

L'utilizzo di dati telerilevati, siano essi satellitari o aerei, permette di mappare la variabilità delle proprietà del terreno (come la vegetazione, la geologia, l'umidità del territorio), sia nello spazio e sia nel tempo, infatti permettono di ottenere un quadro sinottico dell'area in esame e informazioni ambientali molto utili alle diverse scale, da interi continenti fino a dettagli di pochi metri (Youcef Smara et al., 2005).

Sebbene nessuno dei satelliti esistenti ed i loro sensori siano stati progettati al solo scopo di osservare i rischi naturali, la varietà di bande spettrali (VIS visibile, NIR vicino infrarosso, IR infrarosso, SWIR, TIR infrarosso termico e SAR Synthetic Aperture Radar) fornisce un'adeguata copertura spettrale che permette di valorizzare al meglio dati importanti per l'analisi di fenomeni dinamici quali possono essere le catastrofi naturali.

Nella gestione delle catastrofi l'obiettivo degli esperti è da sempre quello di monitorare la situazione e riuscire a simulare al meglio, tramite la realizzazione di modelli adeguati, il fenomeno in modo tale da individuare le zone più soggette al rischio e riuscire a strutturare nel migliore dei modi i piani di emergenza appropriati. In particolare, quindi, il telerilevamento può essere impiegato in maniera efficace nelle diverse fasi della gestione delle catastrofi:

- Nella **fase di prevenzione** dei disastri permette, attraverso uno studio multi-temporale dell'area, di identificare potenziali aree soggette a rischio e di stimare la densità di popolazione nelle aree soggette a disastri;
- Nella **fase di preparazione** alle catastrofi è uno strumento utile per la pianificazione delle rotte di evacuazione, per la progettazione di centri di emergenza ed inoltre, dall'integrazione con altri dati pertinenti, può essere di supporto per la realizzazione dei sistemi di allerta;
- Nella **fase di attuazione** della catastrofe permette di valutare rapidamente la gravità e l'impatto dei danni provocati e di calcolare le vie più veloci ed agevoli per i soccorsi alle vittime, oltre che individuare i luoghi più adatti per il rifugio degli sfollati e dei profughi;

- Nella **fase di riabilitazione** dal disastro permette d'individuare i siti per la ricostruzione.

Ciascuna applicazione ha le sue specifiche esigenze per quello che riguarda la risoluzione spaziale, la risoluzione spettrale e la risoluzione temporale. Spesso è necessario più di un sensore per rispondere adeguatamente a tutti i requisiti di una data applicazione. L'uso combinato di sorgenti multiple di informazione è chiamato integrazione. In molte applicazioni, l'uso di informazioni provenienti da differenti fonti garantisce che l'identificazione degli elementi dell'immagine sia la più accurata possibile. Dati addizionali che possono fornire un aiuto nell'analisi e nella interpretazione delle immagini sono detti "dati ancillari". (Planetek, 2006)

Di seguito sono riportati solo alcuni esempi rappresentativi degli impieghi del Telerilevamento nell'ambito della gestione dei disastri naturali.

2.1.1 Studio di frana

I geologi hanno usato per decenni le foto aeree come dati su cui mappare le unità rocciose (stratigrafia), studiare la forme della terra (geomorfologia), determinare le caratteristiche strutturali (pieghe e faglie), valutare i cambiamenti dinamici prodotti dagli eventi naturali (inondazioni, eruzioni vulcaniche), e determinare indicazioni superficiali (come alterazioni e altri segni di mineralizzazione) di depositi sottostanti di minerali, petrolio e gas, e acqua. Con l'avvento delle immagini spaziali i geologi possono ottenere tre importanti risultati:

- 1) il vantaggio di avere una visione sinottica di grandi aree consente di esaminare in un'unica scena o in un mosaico la struttura geologica del territorio su base regionale;
- 2) la possibilità di analizzare bande multispettrali quantitativamente in termini di numeri (Digital Numbers) consente di applicare tecniche di elaborazione per distinguere o esaltare determinate proprietà dei materiali;
- 3) la possibilità di fondere differenti tipi di prodotti telerilevati (come immagini di riflettanza con immagini radar o termiche) o di combinarli con dati di quota e con altri tipi di informazione (come mappe tematiche, misure geofisiche, campionature chimiche) determina nuove soluzioni per correlare le diverse proprietà dei fenomeni terrestri.

Questi nuovi metodi derivanti dallo spazio si sono rivelati indispensabili per migliorare i processi di mappatura geologica e di esplorazione di risorse minerarie ed energetiche su grande scala (Petrarca 2001).

Le immagini telerilevate, siano foto aeree o immagini da satellite, mostrano la distribuzione superficiale di formazioni e, in condizione appropriate, i tipi di rocce che li costituiscono e proprio per queste peculiarità si dimostrano essere di grande aiuto anche in caso di frane. Caratteristiche tipiche di un'area in cui si è verificata una frana possono essere rigonfiamenti atipici, blocchi di roccia caotica a monte, vegetazione disturbata alla base del pendio, colate di fango e di detriti. La risoluzione spaziale necessaria per il riconoscimento di tali attributi è di circa dieci metri, quindi immagini SPOT PAN o immagini multispettrali IKONOS (4 m) risultano essere le migliori in questo campo, tuttavia il riconoscimento dipende in larga scala dall'esperienza e dalla capacità dell'interprete (Nirupama e Simonovic, 2002).

Uno studio effettuato su immagini di vari satelliti (ERS, SPOT, RADARSAT e LANDSAT) ha permesso di studiare l'impatto e i danni causati da una frana verificatasi nel Novembre 2000, sotto la cresta del Monte Mangart, nella parte Nord Occidentale della Slovenia. In Figura 14 sono riportate le immagini SPOT pre e post evento franoso (Nirupama e Simonovic 2002).

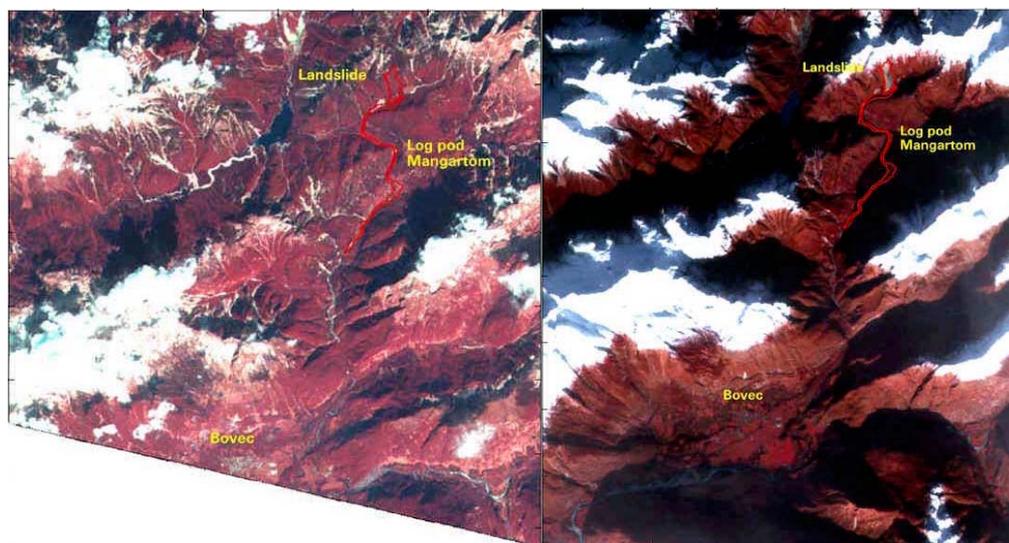


Figura 14- Immagini SPOT acquisite rispettivamente prima e dopo la frana che si è verificata nel Novembre 2000, sotto la cresta del Monte Mangart, nella parte Nord Occidentale della Slovenia. Immagini usate per stimare il danno complessivo e l'impatto della frana.

A causa del terremoto avvenuto a Niigata-Ken Chuetsu, in Giappone nel 2004 si sono verificate numerose frane su una zona montuosa di circa 250 Km² di superficie. In questo caso (Carr e Rathje, 2008), è stata condotta una classificazione supervisionata (impiegando l'algoritmo della massima verosimiglianza), su immagini IKONOS e Quickbird andando ad individuare le aree di vegetazione dismesse, fornendo così una valida assistenza nella produzione della mappatura dei danni post-calamità.

Un esempio significativo dell'impiego dei dati telerilevati nel nostro Paese, è stato l'utilizzo dei dati satellitari SAR per aggiornare e migliorare i risultati del progetto IFFI, Inventario dei Fenomeni Fransi in Italia. In molti casi le misure hanno consentito di definire meglio i limiti di frana, di stabilire lo stato di attività dei movimenti e di individuare nuovi fenomeni non riconoscibili con metodi di rilevamento tradizionali. L'analisi di spostamenti superficiali è resa possibile sfruttando l'informazione principale rilevata da un qualsiasi sistema radar: la misura della distanza tra il sensore e il bersaglio "illuminato".

Nel quadro del progetto SLAM (Servizio per Monitoraggio Frane) finanziato dalla Agenzia Spaziale Europea, l'analisi del movimento dei Permanent Scatters (PS) è stata eseguita su immagini ad alta risoluzione a scala di bacino, su tutto il territorio del Bacino Idrografico dell'Arno, Italia Centrale (Figura 15). Circa 350 immagini SAR sono state trattate interferometricamente mediante la tecnica dell'individuazione dei PS (sono stati individuati circa 650.000 PS).

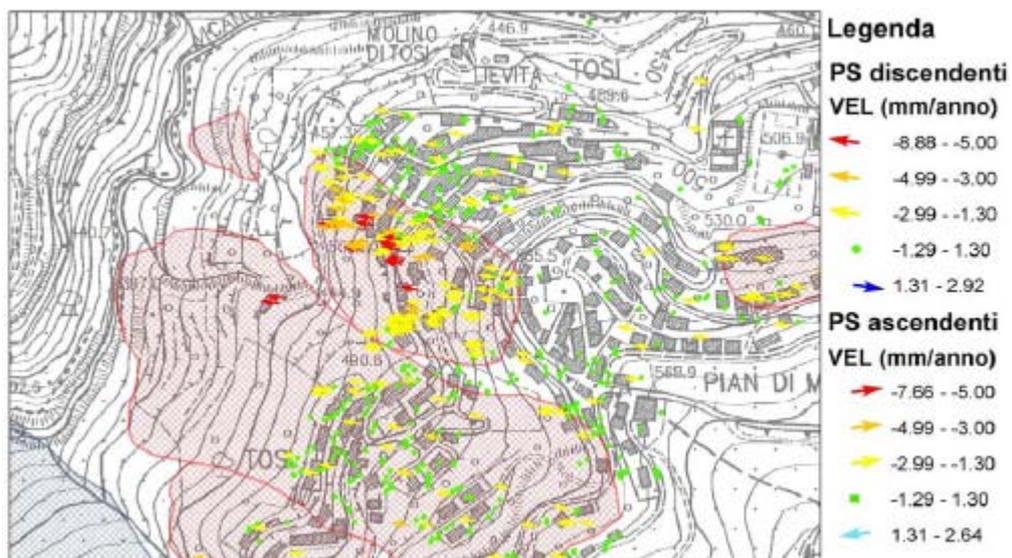


Figura 15- Sovrapposizione tra la mappa dell'area e i PS classificati con riferimento alla velocità espressa in mm/anno

L'elaborazione delle immagini SPOT5 e foto aeree, è stata eseguita per la estrazione di caratteristiche legate alla presenza di frana, utile per l'analisi geomorfologica e, di conseguenza, per dare un senso spaziale alle informazioni puntuali fornite dall'analisi sui PS. Questa procedura è stata accompagnata da un'intensa fase di interpretazione geologica, caratterizzata dalla tradizionale analisi in situ (P.Farina, et al. 2008).

2.1.2 Gli incendi boschivi.

Gli incendi delle aree forestate rappresentano una costante, ormai da decenni, di tutti i periodi estivi. Le origini sono quasi tutte di natura dolosa, spinte da finalità psicotiche o economiche. Per prevenire le cause che attivano i piromani il satellite nulla può, ma risulta essere determinante nell'attività di "fire-watching".

Per fornire un adeguata risposta agli incendi boschivi, vengono richieste quattro fasi di analisi e valutazione:

- Determinazione del potenziale rischio d'incendio;
- Rilevamento dell'inizio dell'incendio;
- Monitoraggio attivo dell'incendio;
- Valutazione del degrado post-incendio.

Il telerilevamento è stato ampiamente sperimentato come strumento per ottenere le informazioni richieste nelle quattro diverse fasi sopra elencate (Roy, 2003).

Per realizzare un sistema di monitoraggio da satellite delle aree boschive è necessario individuare innanzitutto l'area interessata; il passo successivo consiste nell'effettuare un inventario spettrale delle varie specie arboree presenti e ripeterlo per le differenti stagioni. Tutto questo ha lo scopo di verificare la risposta al satellite in situazione di normalità delle varie specie. Successivamente si effettua una ricerca storica su di un'area già interessata da incendio e le cui specie arboree erano note e si analizzano le immagini relative all'incendio in atto e quelle successive all'estinzione delle fiamme. Una volta analizzate e catalogate le impronte spettrali tipiche del fenomeno incendio, si attua un monitoraggio ed analisi sui dati costantemente aggiornati (Petrarca, 2001).

In Figura 16 è riportato l'esempio dell'analisi effettuata in Catalogna (Spagna), in un arco temporale che va dal 1975 al 1993 su delle immagini Landsat-MSS

(Raimon Salvador et al., 1998). Le immagini, una volta ortorettificate e coregistrate, hanno permesso di evidenziare la frequenza degli incendi e le aree che maggiormente ne sono state colpite nei diciotto anni presi in esame.

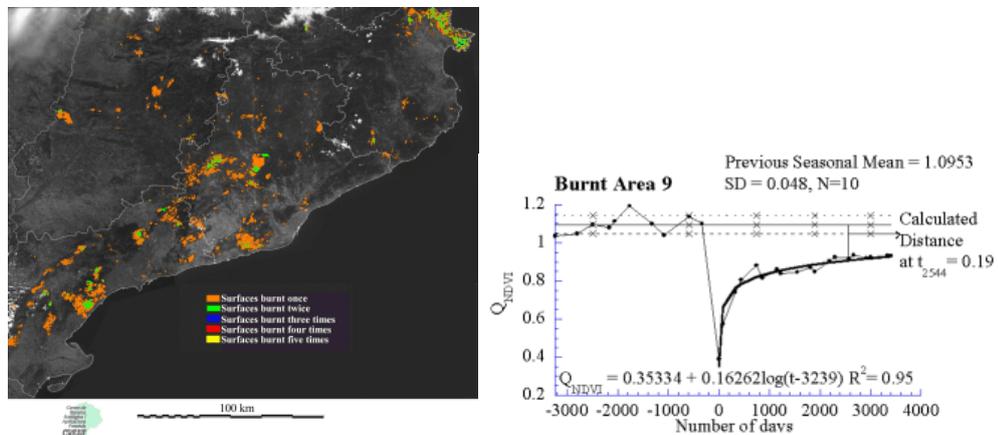


Figura 16- a) Mappa delle aree bruciate e della frequenza degli incendi boschivi in Catalogna nel periodo tra il 1975 e il 1993. b) Evoluzione del quoziente NDVI (QNDVI) tra area bruciata e area di controllo prima e dopo l'incendio del Maresme nel 1983 in Spagna.

Studi sull'indice di vegetazione NDVI (Raimon Salvador et al., 1998), il quale mette in relazione l'assorbimento spettrale della clorofilla nella banda del rosso con la riflessione del vicino infrarosso ed è influenzato dal tipo di struttura fogliare, hanno dimostrato come modelli basati su quest'ultimo siano molto validi per l'analisi delle aree soggette ad incendi, in quanto permette di verificare non solo lo stato della vegetazione al momento del disastro, ma anche di valutare il grado di rigenerazione della zona colpita dal fuoco, nell'ottica di monitoraggi futuri.

Inoltre, nell'ottica della prevenzione antincendio, l'analisi degli indici NDVI e l'NDVI trasformato (TNDVI), permette di determinare, come già visto nel paragrafo precedente, le diverse tipologie di vegetazione presente nell'area in esame e quindi di risalire alla suscettibilità di queste al fuoco, in modo tale da ottenere la suddivisione nelle diverse classi di rischio, facilitando così gli aspetti amministrativi e tecnici nella prevenzione del disastro. Uno studio di questo tipo è stato condotto (Mycke-Dominko 2004) in Polonia nel distretto di Dobieszyn Ranger che si trova vicino la confluenza dei fiumi Pilica, Radomka and Vistula, a Nord del Radom. L'analisi è stata effettuata su immagini LANDSAT TM, IKONOS e NOAA-AVHRR, ed ha permesso di distinguere tre categorie diverse di rischio (Figura 17):

- categoria I alto rischi d'incendio;
- categoria II moderato rischio d'incendio;
- categoria III basso rischio d'incendio.

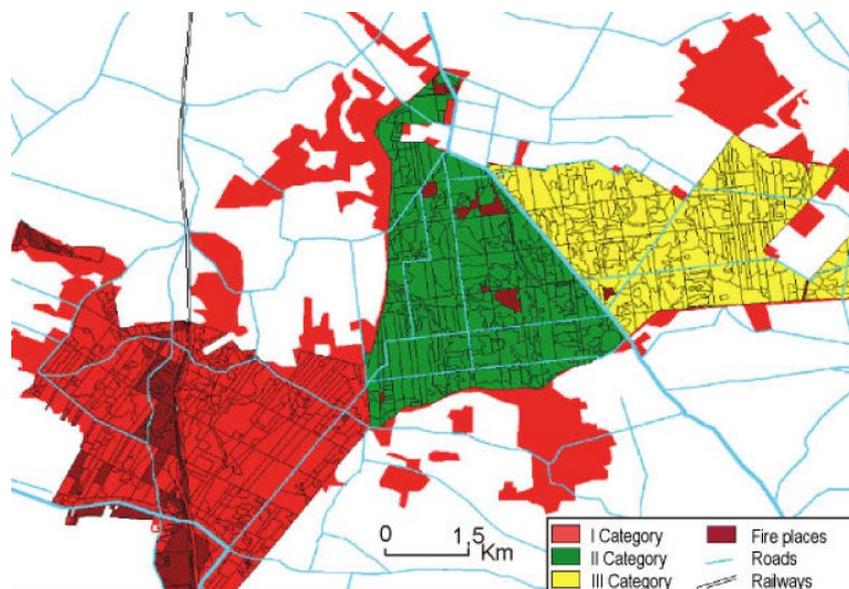


Figura 17 - Mappa tematica delle diverse categorie di rischio d'incendio del distretto di Dobieszyn

Il lavoro sulle immagini però non si ferma all'avvistamento, ma consta di due aspetti ancora più importanti:

- l'identificazione dei percorsi e delle vie più adatte per i mezzi di soccorso;
- delimitazione delle aree incendiate su cui imporre il vincolo di destinazione d'uso.

Nell'inventario delle aree da monitorare vengono anche acquisite informazioni circa le strade ed i sentieri, nonché sulla percorribilità con mezzi più o meno pesanti, l'orientamento rispetto ai venti caratteristici della zona e la presenza di bacini o specchi d'acqua nei dintorni con relativa rotta e corridoi di ammaraggio e risalita.

L'ultimo aspetto riguarda la perimetrazione delle aree già interessate da incendio; la legge impone agli enti locali di porre il vincolo sulla destinazione d'uso delle aree boschive percorse da incendio per 15 anni, sia per permettere alla flora di riattecchire ed al terreno di recuperare sali minerali, ceneri e nutrienti sia per disincentivare la pratica, comune fino all'entrata in vigore di questa normativa, che consisteva nel dare fuoco ai boschi per creare aree edificabili (Petrarca, 2001).

Uno studio sulla perimetrazione post-fire delle aree bruciate è stata condotta tramite l'impiego di indici spettrali presenti in letteratura, quali BAI (Burned Area Index), NBR (Normalized Burn Ratio) e MIRBI (Mid-InfraRed Bispectral Index), seguendo due diversi approcci: il primo mono-temporale, andando a calcolare gli indici per la classificazione su un'unica immagine post-fire; il secondo multi temporale, valutando per ogni pixel le differenze tra i valori degli indici riferiti ad immagini pre e post incendio (Bitelli e Conte, 2008). La sperimentazione ha interessato la provincia di Enna in Sicilia, che è stata colpita da numerosi incendi nell'estate del 2007. Le immagini su cui è stata condotta l'analisi sono delle ASTER di cui sono state usate le tre bande del VNIR (con risoluzione geometrica 15 m) e le sei bande del SWIR (30 m, ricampionate a 15 m). Dai risultati ottenuti si è potuto vedere come, l'algoritmo di sogliatura multipla con *threshold* fissi, limiti notevolmente gli errori di confusione degli algoritmi di classificazione con un singolo indice e permette mappature accurate solo con un lieve aumento della complessità operativa.

2.1.3 Il controllo dei versamenti in mare di idrocarburi.

Lo "spill oil detection" è una tecnica che permette di individuare sia i grandi disastri ecologici nei naufragi delle petroliere, sia le piccole perdite, volute o meno, derivanti da scarico dei liquidi di lavaggio delle cisterne.

Il monitoraggio via satellite ed in particolare mediante osservazioni radar ad apertura sintetica (SAR), può rappresentare uno strumento efficace da integrare con la tradizionale sorveglianza aerea; infatti la capacità delle immagini radar SAR d'individuare le chiazze di idrocarburi sulla superficie marina è ben nota e collaudata da tempo (Topouzelis et al., 2007).

Il lavoro di riconoscimento è facilitato dal fatto di trovarsi in una superficie con risposta spettrale completamente uniforme e quindi una minima variazione nella specifica direzione della firma spettrale del petrolio fa scattare subito l'allarme.

L'analisi delle immagini Radar può quindi, fornire le seguenti informazioni, in caso di fuoriuscita di petrolio (Maya Nand Jha et al., 2008):

- La posizione e la diffusione di una fuoriuscita di olio su una vasta area;
- La distribuzione dello spessore, per stimarne la quantità fuoriuscita;

- Una classificazione del tipo di olio, al fine di stimare i danni ambientali e di prendere le misure di risposta adeguate;

- Una tempestiva informazione, preziosa in soccorso alle operazioni di pulizia.

L'identificazione della chiazza porta inoltre all'identificazione del colpevole mediante la ricerca della scia lasciata in superficie, e l'analisi delle correnti marine.

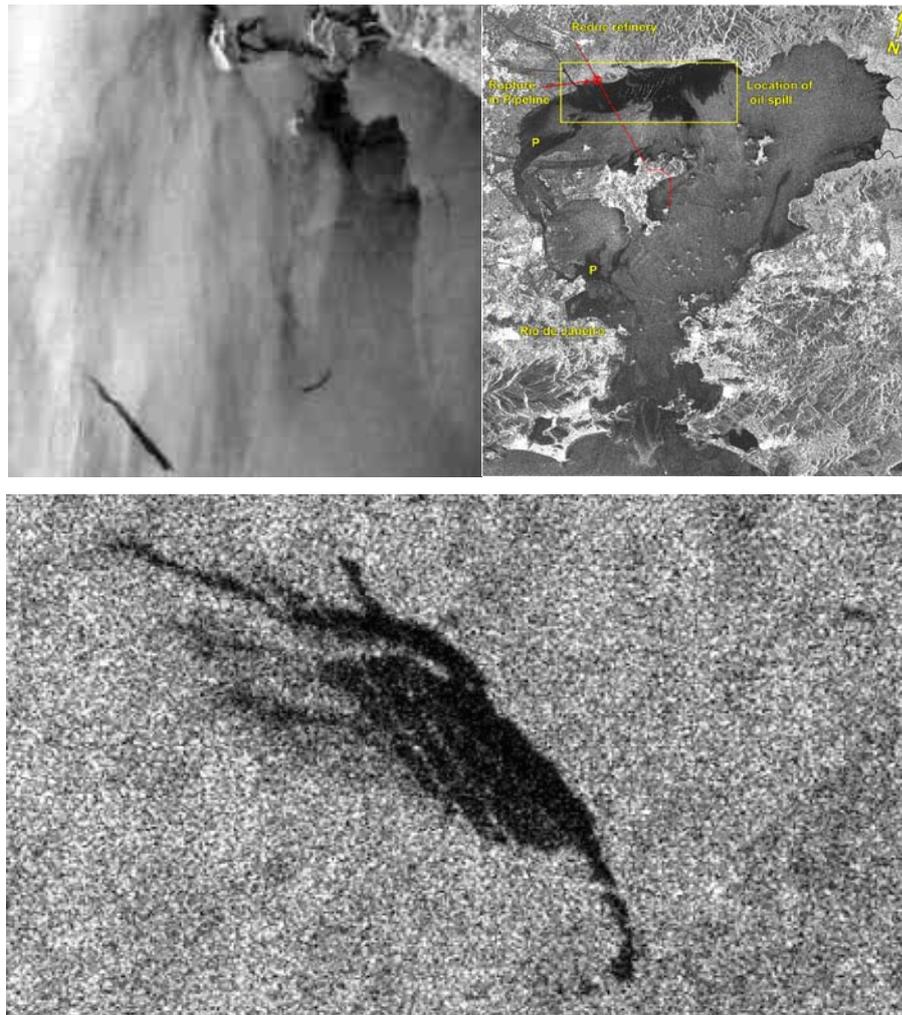


Figura 18- a) Chiazza d'idrocarburi al largo dell'Argentario (ERS.). La chiazza più larga è lunga circa 22 km; b) Chiazza provocata dalla rottura di un oleodotto nella Baia di Guanabara vicino a Rio de Janeiro (RADARSAT); c) Chiazza a largo di Ancona (SAR).

2.1.4 I Terremoti

In caso di evento sismico, una veloce mappatura delle aree colpite può essere molto utile, in particolare quando l'epicentro del terremoto si trova in zone difficili da raggiungere, o i sistemi principali di comunicazione sono danneggiati. Il modo più efficace per difendersi dai terremoti è quello della mitigazione del rischio

sismico, avendo una conoscenza approfondita delle caratteristiche sismo-genetiche del territorio che porti a definire diversi livelli di pericolosità sismica e a valutare il livello di esposizione e di vulnerabilità del patrimonio costruito e delle infra-strutture in relazione al livello di protezione adottato (Bitelli, Camassi, et al., 2004).

Con lo scopo di evidenziare l'importanza dell'uso dell'immagini multispettrali in caso di evento sismico, Bitelli et al. (2004) hanno analizzato il terremoto di magnitudo pari a 6.8 gradi sulla scala Richter, avvenuto il 31 Maggio 2003, nella provincia di Boumerdes, in Algeria, portando avanti uno studio su immagini sia a medio-alta risoluzione (es. IRS) che ad altissima risoluzione (es. QuickBird). Su tali immagini sono stati esaminati due diversi approcci per l'analisi del danneggiamento sismico in area urbana: una classificazione object-based e una più "classica" pixel-based. I risultati ottenuti hanno dimostrato come sia possibile individuare le strutture caratterizzate da un danneggiamento strutturale grave con crolli parziali in entrambi i metodi.

Uno studio analogo è stato condotto da Stramondo et al. (2006) ;l'obiettivo di questo lavoro è stato quello di analizzare la capacità delle tecniche di telerilevamento per l'individuazione del danno in aree urbane e di esplorare l'uso combinato di Radar (SAR) e dati da satellite ottico. Sono stati esaminati due eventi sismici: Izmit (1999, Turchia) e Bam (2003; Iran). Entrambe le zone sono state interessate da forti terremoti che hanno causato pesanti ed estesi danni negli insediamenti urbani nei pressi dell'epicentro. Le procedure di valutazione sono state diverse e sono state effettuate, anche in questo caso, sia classificazioni basate sui pixel e sia classificazioni ad oggetto. Le diverse caratteristiche dell'area sono state estratte da dati ottici e radar andando a combinare le misurazioni a diversi intervalli di frequenza (Stramondo, et al. 2006). I risultati ottenuti, espressi in percentuale di accuratezza delle classificazioni, sono riportati in Tabella 5.

Tabella 5- Risultati dello studio condotto sia su immagini ottiche (con risoluzione a 5m), sia sul radar (SAR) in due casi di studio. Dati espressi in percentuale di accuratezza della classificazione delle immagini.

	SAR	OTTICO	Combinazione SAR e OTTICO
Izmit	70%	82%	89%
Bam	61%	70%	76%

A seguito del violento terremoto che ha colpito l'isola di Haiti il 12 Gennaio 2010, l'ASI (Agenzia Spaziale Italiana) ha operato a supporto del Dipartimento della Protezione Civile coordinando diverse attività di utilizzo dei dati satellitari ottici e radar ai fini del monitoraggio dell'emergenza, della valutazione dei danni e dell'organizzazione dei soccorsi italiani. Una particolare attenzione si è avuta per le misure interferometriche co-sismiche, che forniscono una stima della deformazione superficiale dell'area dovuta alla forte scossa sismica. Un risultato particolarmente significativo è stato ottenuto combinando le potenzialità dell'interferometria a quelle dell'altissima risoluzione. Sono state considerate tre acquisizioni Spotlight a risoluzione 1 metro, una precedente all'evento sismico (12 Dicembre 2009), e due successive, acquisite a distanza di otto giorni (il 21 ed il 29 Gennaio 2010). L'altissima risoluzione dei dati COSMO-SkyMed permette di evidenziare una grossa deformazione dell'area costiera, evidenziata in rosso in Figura 19b.

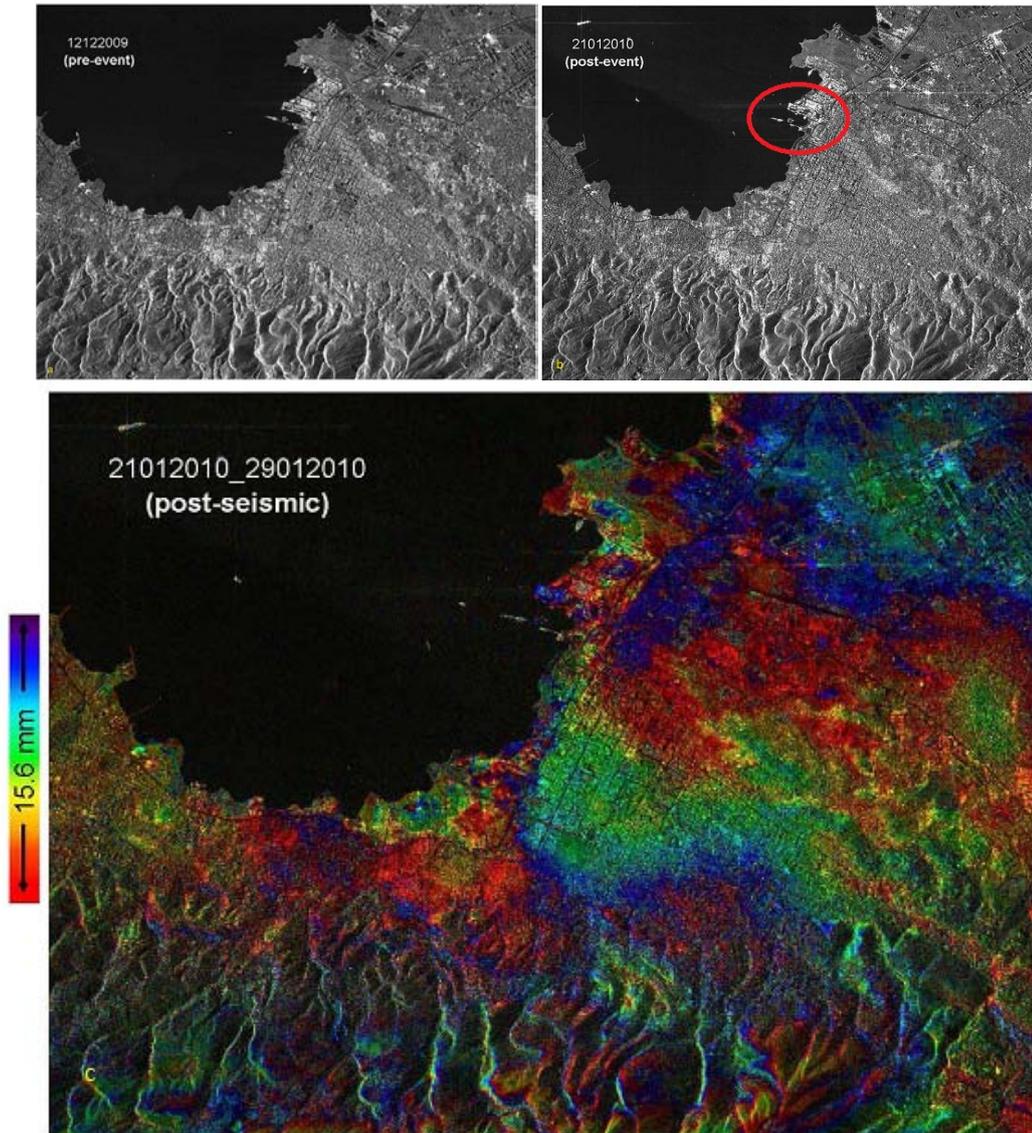


Figura 19- a) Immagine modulo spotlight (in coordinate radar) acquisita il 12-12-2009 dal sensore CSK2; b) Immagine modulo spotlight (in coordinate radar) acquisita il 21-01-2010 dal sensore CSK1 in cui è stato evidenziato in rosso l'area costiera dissestata; c) Interferogramma differenziale post-sismico fra l'acquisizione del 21-01-2010 e quella del 29-01-2010 sovrapposto all'immagine modulo (in coordinate radar). Ad ogni ciclo di colore corrisponde una deformazione lungo la linea di vista del sensore di circa 15.6mm. La baseline perpendicolare è di circa 67m (www.protezionecivile.it).

Le immagini telerilevate si sono dimostrate particolarmente utili anche nell'identificare i danni nell'immediato, in modo tale da dare un valido supporto nel coordinare al meglio i piani di soccorso e le aree di raccolta degli sfollati. Infatti l'impatto di un terremoto è chiaramente visibile nel paragone delle immagini satellitari prima e dopo il disastro, come si può notare in Figura 20, dove è evidente il dissesto dovuto allo tsunami, causato dal terremoto che ha colpito il Giappone lo scorso 11 Marzo.



Figura 20- Immagini pre e post tsunami, che comprendono la zona di Minamisanriku e l'impianto nucleare di Onagawa (Giappone). Solo in Minamisanriku più di 10.000 persone sono disperse (www.gim-international.com).

2.1.5 Le alluvioni

Nell'idrologia superficiale, tramite l'uso di satelliti ottici o radar, è possibile identificare variazioni del drenaggio superficiale in ambito locale o regionale. L'analisi della rete idrica coinvolge azioni di mappatura, misura e classificazione di segmenti fluviali, complessità di configurazioni dei bacini, nonché la localizzazione di sorgenti, laghi, pozze. Inoltre, l'applicazione delle immagini rilevate ha particolare importanza nel caso di alluvioni. Tali fenomeni sono tra i pericoli naturali più devastanti del mondo, con la maggiore percentuale di morti e danni alle proprietà. Le alluvioni sono frutto di deflusso in eccesso, che potrebbe aumentare o diminuire a seconda di diversi fattori, quali ad esempio l'intensità delle precipitazioni, scioglimento delle nevi, il tipo di suolo, le condizioni di umidità di quest'ultimo e l'uso del territorio, infatti, quando eventi meteorologici estremi si verificano in zone con alto grado di urbanizzazione l'allagamento che ne consegue risulta essere più esteso (Zhou, et al., 2010).

L'utilizzo dei dati satellitari per lo studio di alluvioni è fondamentale nei Paesi del Terzo Mondo, dove è difficile per i governi aggiornare le proprie banche dati con le tecniche di rilevamento e metodi di mappatura tradizionali che sono entrambe lunghe e onerose (Dewan, Alam e Nishigaki, 2005).

Le immagini satellitari nell'ambito della gestione di eventi alluvionali possono essere di supporto nei diversi momenti che descrivono questi disastri naturali, quali:

1. Studio dei territori e individuazione delle aree soggette a rischio tramite la conoscenza della zona d'interesse;
2. Monitoraggio durante l'inondazione;
3. Pianificazione delle risposte adeguate in seguito all'alluvione.

La prima fase risulta essere di particolare importanza, in quanto si è dimostrato come la conoscenza storica del territorio può aiutare a prevenire eventi futuri (Jeyaseelan, 2004). In caso di inondazioni, infatti, è importante analizzare le zone interessate e i danni provocati nelle esperienze passate, in modo da poter redigere una mappa delle aree che maggiormente possono essere soggette a rischio. L'individuazione di queste zone di rischio può avvenire sia in maniera più dettagliata (necessaria per la valutazione dei pericoli), sia a più ampia scala, andando ad analizzare l'intera fascia costiera o l'intero bacino idrografico (fondamentale per un inquadramento generale delle zone a rischio).

Uno studio di questo tipo è stato condotto nella regione del Gloucestershire, nel Sud Ovest dell'Inghilterra, che è stato colpita da gravi inondazioni del fiume Severn nell'Estate del 2007. Al fine di effettuare un'analisi sperimentale è stato scelto un set di dati bi-temporale che si compone di due scene TerraSAR-X StripMap con risoluzione spaziale 3m. La prima immagine è stata acquisita in polarizzazione HH il 25 luglio 2007, in un tratto di circa 69 km, lungo il fiume Severn. La seconda immagine è stata registrata circa un anno dopo (22 luglio 2008) ed interessa quasi la stessa copertura geografica, con il livello dell'acqua fluviale in condizioni normali. La sperimentazione è stata condotta basandosi sul modello markoviano ibrido applicato ai dati SAR ed è stata condotta poi una classificazione non supervisionata (Figura 21) che ha permesso l'individuazione delle aree maggiormente esposte al rischio inondazione (Martinis, Twele e Voigt 2010).

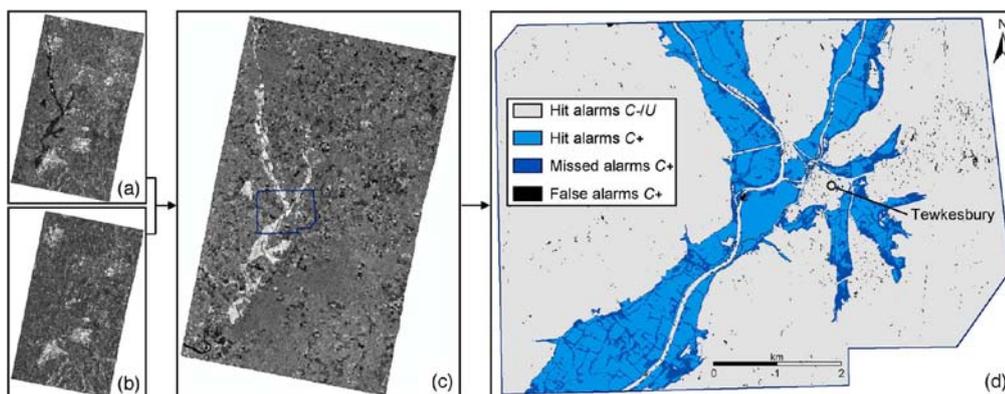


Figura 21- Immagini TerraSAR-X del bacino fluviale Severn, Inghilterra: a)immagine pre-alluvione;b) immagine post-alluvione;c)Immagine dell'Indice di Cambiamento Normalizzato (NCI); classificazione dell'area derivata dal modello marcoviano ibrido

Il monitoraggio delle alluvioni a scala temporale, in supporto ai modelli idrodinamici, può individuare l'intensità e la propagazione della precipitazione, infatti, i satelliti meteorologici individuano vari aspetti del ciclo idrologico, come il tasso di umidità e la saturazione del terreno. Per di più, i modelli idrologici stessi richiedono in input diversi dati, come uso/copertura del suolo, umidità del terreno e modelli digitali di elevazione (DEM) al fine di mappare anche la rugosità del territorio (ad esempio DEM con risoluzione che va da 3 a 10 metri possono essere ricavati da dati satellitari RADARSAT, SPOT e IRS) (Dewan, Nishigaki e Komatsu 2004). Oltre alla creazione di DEM, i dati SAR possono essere utilizzati per determinare la batimetria di costa nei modelli di simulazione d'onda. Inoltre, il Synthetic Aperture Radar permette un monitoraggio continuo della Terra senza influenze da parte dell'atmosfera e della copertura nuvolosa che rappresenta un handicap per le immagini ottiche. Informazioni riguardanti l'uso e la copertura del suolo possono essere determinate, invece, mediante l'uso di immagini Landsat, AVHRR, SPOT e IRS.

Per analizzare l'impatto dell'alluvione che nel Settembre del 1999 ha colpito la valle e il delta del fiume Senegal, sono stati eseguiti diversi studi su immagini Landsat ETM+ (Figura 22), ERS2 e AVHRR che hanno permesso di monitorare la zona attraverso classificazioni supervisionate con il metodo della massima verosimiglianza (Sandholt, et al. 2003).

Uno studio analogo svolto, sempre in Senegal per lo stesso evento alluvionale è stato condotto su immagini SPOT4 rilevate nel 1999, 2000 e 2001, le quali sono state classificate con l'algoritmo della massima verosimiglianza attraverso il

software per il processamento delle immagini ENVI (Figura 23). Questa volta l'area d'interesse è la città di Saint Louis vicino l'estuario del fiume Senegal (Dia 2005).

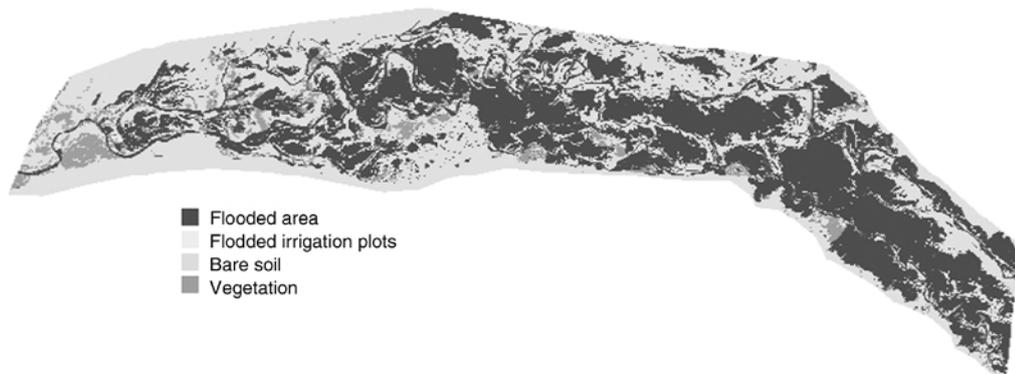


Figura 22- Classificazione supervisionata determinata con l'algoritmo della massima verosimiglianza su un immagine Landsat ETM+ del Settembre 1999, riva del fiume Senegal.

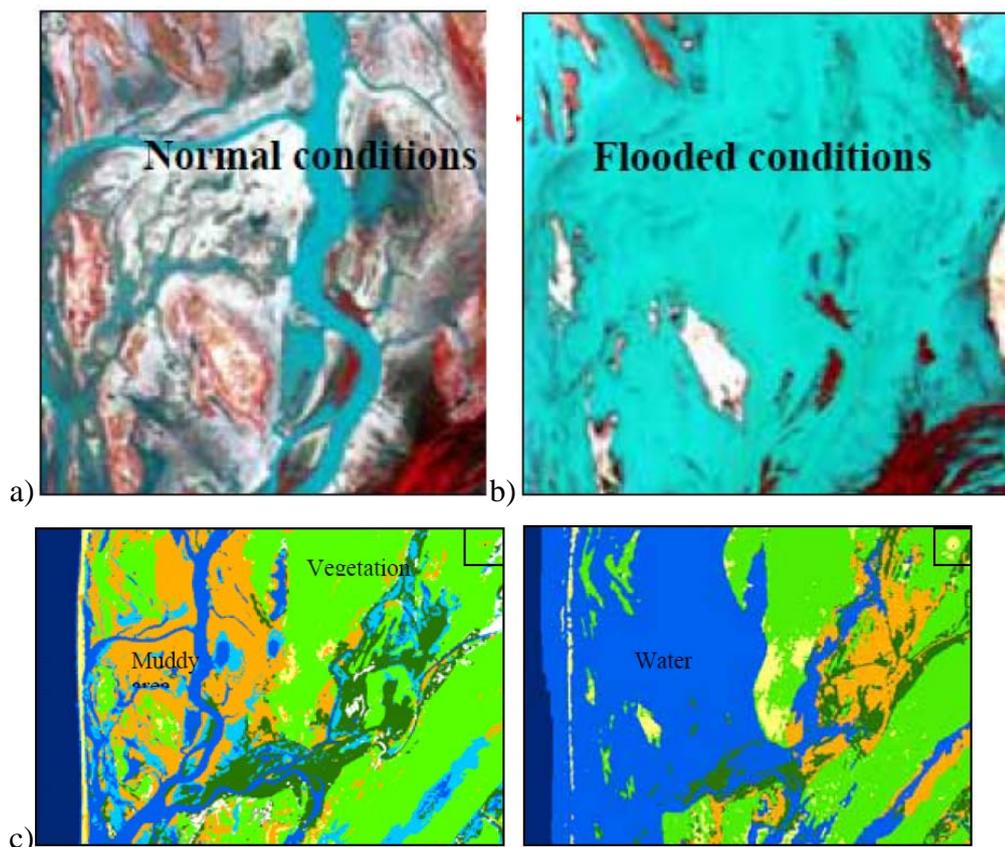


Figura 23- Immagini SPOT4 dell'estuario del fiume Senegal:a)area in condizioni normali rilevata ad Ottobre 2001;b)area alluvionata rilevata nell'Ottobre 1999; c)Classificazione supervisionata della zona.

Durante le inondazioni sono richieste dalle autorità tempestive e dettagliate relazioni sulla situazione in corso, in modo da individuare le aree disastrose ed

identificare le zone da destinare ai rifugi e ai soccorsi. Le informazioni che possono essere dedotte dalle immagini telerilevate, siano esse aeree o satellitari, in tempo reale sono:

- portata e mappatura dell'onda di piena;
- danni agli edifici e alle infrastrutture;
- valutazione dei danni secondari, come ad esempio l'inquinamento dovuto al dilavamento di una discarica;
- stima dell'intensità, del movimento e della durata delle precipitazioni nelle successive ore, grazie ai satelliti meteorologici; ad esempio, in Figura 24 è riportata un'immagine METEOSAT dove si vede l'evoluzione del ciclone Yasi che ha devastato l'Australia lo scorso Febbraio.

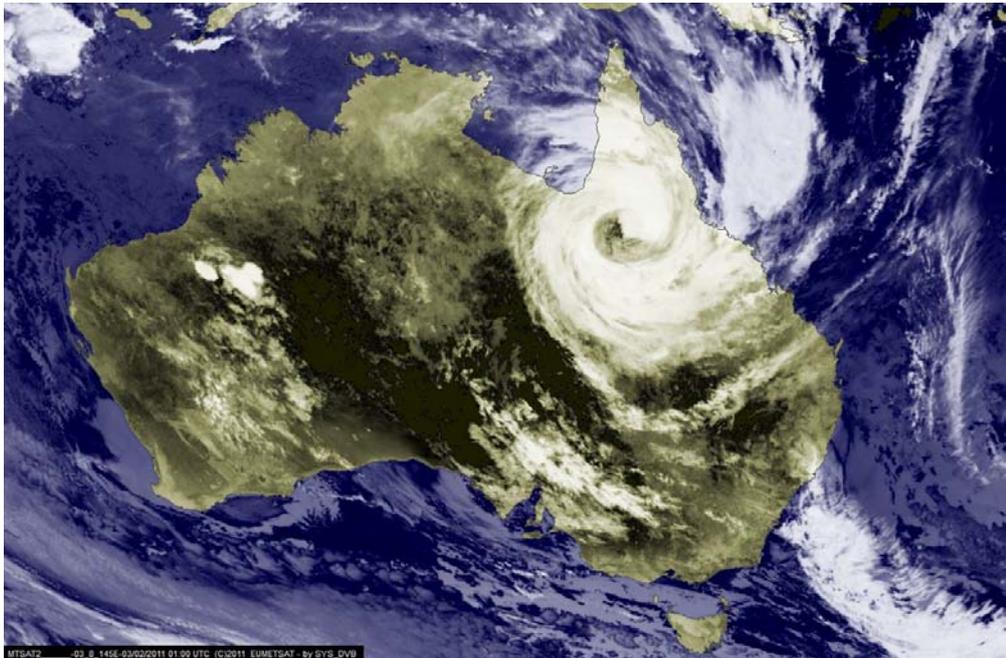


Figura 24- Immagine METEOSAT ripresa il 3 Febbraio 2011 che riprende il ciclone Yasi, Australia.

Nella fase successiva all'alluvione, anche se il fattore tempo non è più importante come durante il disastro, il telerilevamento, sia a media o alta risoluzione, insieme ad un sistema operativo d'informazione geografica, è utile nella pianificazione degli interventi, dalla ricostruzione all'adeguamento delle infrastrutture presenti. I dati a media risoluzione, infatti possono definire i confini delle aree alluvionate, stabilire l'entità dei danni ed individuare le eventuali frane

innescate dall'inondazione; mentre alle alte risoluzioni si possono evidenziare il luogo e il grado di danno in maniera più dettagliata.

2.2 Le organizzazioni e gli enti internazionali

Allo scopo di diffondere e favorire l'uso delle immagini satellitari nella gestione dei disastri naturali, sono attualmente presenti diverse organizzazioni di carattere internazionale, promosse da enti di ricerca, da agenzie governative o da organismi sopranazionali., di cui di seguito verrà riportato un breve elenco (Bitelli, Gusella e Mognol, 2007):

- UN-SPIDER (creata da United Nations Office for Outer Space Affairs) piattaforma delle Nazioni Unite per le informazioni spaziali per la gestione delle catastrofi e di risposta alle emergenze; tale organizzazione mira a fornire l'accesso universale a tutti i tipi di informazioni spaziali basate e servizi di supporto per la gestione delle catastrofi(www.un-spider.org);
- ReliefWeb è stato lanciato nel 1996 ed è amministrato dall' UNOCHA (United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs). Il sito ha come obiettivo quello di aiutare le missioni umanitarie in tutto il mondo, mettendo a disposizione la scansione del contenuto dei siti web e di organizzazioni non governative internazionali, governi, istituti di ricerca, comunicati stampa, appelli, documenti, analisi e mappe relative alle emergenze umanitarie in tutto il mondo (<http://reliefweb.int>);
- UNOSAT è un programma delle Nazioni Unite in co-operazione con UNOPS (UN Office for Project Services) e il CERN. Ha come obiettivo quello di aumentare l'accesso all'informazione territoriale, soprattutto da parte dei paesi in via di sviluppo, per scopi umanitari, prevenzione disastri e ricostruzione post-crisi. Distribuisce immagini e mappe, fornendo, anche supporto tecnico e metodologico per la loro produzione (<http://unosat.web.cern.ch/unosat/>);
- GMES (Global Monitoring for Environment and Security) rappresenta il sistema europeo per la gestione delle informazioni geografiche al fine di creare dei veri e propri servizi, basandosi sull'osservazione del pianeta Terra dalla missione satellitare Earth Observation (EO). Di questa

iniziativa fanno parte sia *Risk-EOS*, rete di fornitori di servizi di geo-informazione di supporto alla gestione di alluvioni, incendi, e altri rischi in ogni loro fase (<http://www.risk-eos.com>) e sia *Respond*, organizzazione nata allo scopo di aumentare le capacità della comunità europea ed internazionale nel campo delle informazioni geografiche, provvedendo un accesso appropriato a mappe e prodotti derivati dal telerilevamento (<http://www.respond-int.org/Respond/>);

- GDACS (Global Disaster Alert and Coordination System), patrocinato dalle Nazioni Unite, ha l'obiettivo di consolidare e rafforzare la rete di fornitori e utilizzatori delle informazioni sulle catastrofi a livello mondiale, al fine di fornire, in tempo reale, affidabili e precise segnalazioni e valutazioni sull'impatto di un disastro e di migliorare la cooperazione internazionale nel periodo immediatamente successivo a gravi catastrofi naturali (<http://www.gdacs.org>);
- International Charter "Space and Major Disaster", mira a fornire un sistema unificato di acquisizione di dati spaziali in caso di calamità naturali o antropiche, contribuendo a mitigare gli effetti delle catastrofi sulla vita umana e sulle proprietà. Tra i membri dell' International Charter troviamo le agenzie spaziali ESA (European Space Agency), CSA (Canadian Space Agency), CNES (Centre national d'études spaziale) (<http://www.disasterscharter.org>).
- ZKI (*Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation*): è un servizio del centro aerospaziale tedesco DLR. Esso elabora ed analizza le immagini satellitari durante le calamità naturali e ambientali; i prodotti informativi sono poi forniti per sostenere le operazioni di gestione delle calamità, le attività di soccorso umanitario e di problemi di sicurezza civile (<http://www.zki.dlr.de>);
- RSI - *Remote Sensing Institute* nasce da MCEER (*Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering*) come piattaforma per lo sviluppo e l'implementazione operativa di tecniche di monitoraggio post-disastro, in particolare di carattere sismico, basate su sistemi GIS e *Remote Sensing* (<http://mceer.buffalo.edu>);

- *ITHACA (Information Technology for Humanitarian Assistance, Cooperation and Action)* è l'associazione in collaborazione con la quale è stata svolta la presente attività di tesi. Una breve descrizione del progetto ITHACA è riportata nel paragrafo seguente.

2.2.1 ITHACA

ITHACA (Information Technology for Humanitarian Assistance, Cooperation and Action) è un'organizzazione no-profit, fondata nel Novembre 2006 dal Politecnico di Torino e SiTI (Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali per l'Innovazione) e conduce attività operative e di ricerca nel settore della geomatica per l'analisi, la valutazione e la mitigazione dei danni nei casi di emergenze ambientali. In particolare ITHACA collabora con il WFP (World Food Programme), la maggiore agenzia operativa delle Nazioni Unite nel campo umanitario e nella risposta alle emergenze, rispondendo a più di cento emergenze e catastrofi naturali ogni anno in ogni parte del mondo, e garantendo la distribuzione di beni di sopravvivenza fondamentali (Ajmar, et al. 2008). ITHACA coordina alcuni progetti di ricerca finalizzati a fornire supporto alle attività del WFP ed in particolare:

- nella fase *Early Warning*, vengono impiegate metodologie diverse di visualizzazione, analisi ed integrazione con dati provenienti da varie fonti, al fine di anticipare il percorso di eventi catastrofici e loro effetti sulla popolazione;
- nella fase *Early Impact* il telerilevamento e le immagini satellitari vengono adoperate per determinare rapidamente l'impatto di un particolare evento catastrofico nelle prime ore in seguito all'accaduto, fornendo in tempi brevi (24-48 ore) la cartografia necessaria per valutare gli effetti sulla popolazione e sulle infrastrutture.

I maggiori campi di applicazione sono gli eventi alluvionali, i terremoti, i cicloni e la siccità. Di seguito sono riportati due esempi di mappe prodotte da ITHACA, rispettivamente nel caso dell'alluvione in Pakistan avvenuta nel Settembre del 2010 e nel caso del terremoto avvenuto ad Haiti nel Gennaio dello stesso anno.

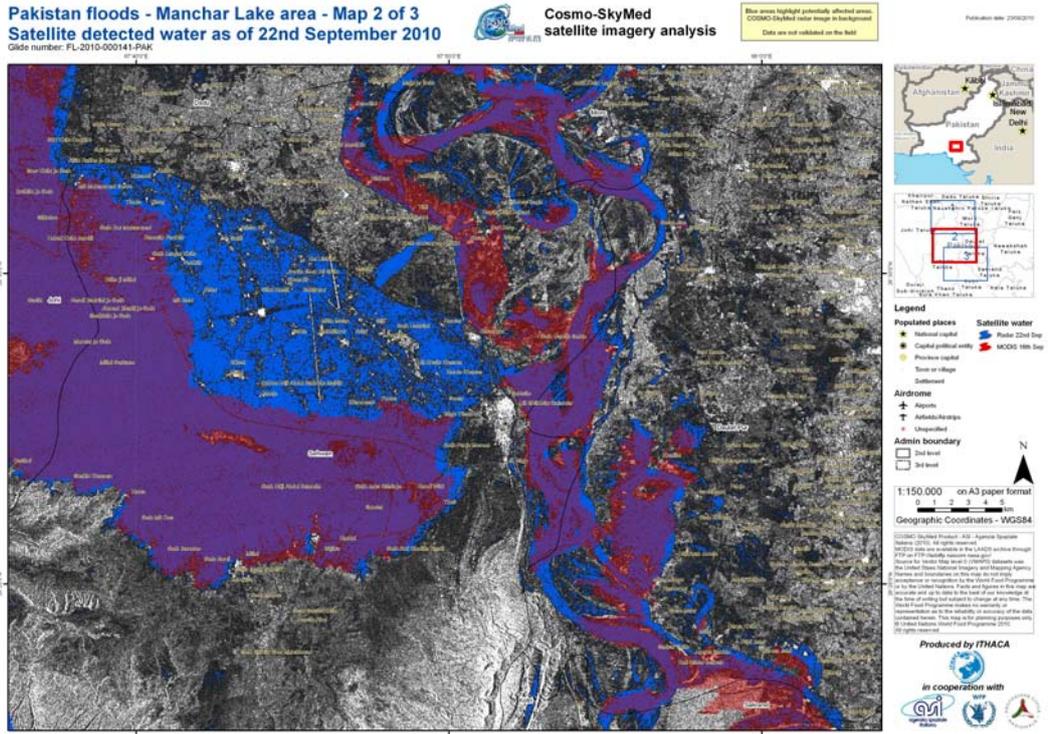


Figura 25 - Alluvione in Pakistan - Lago di Manchar. Mappa realizzata da ITHACA il 23 Settembre 2010. La mappa è stata prodotta dall'analisi di immagini CosmoSkymed, in cui in blu sono state evidenziate le aree potenzialmente colpite dall'alluvione.

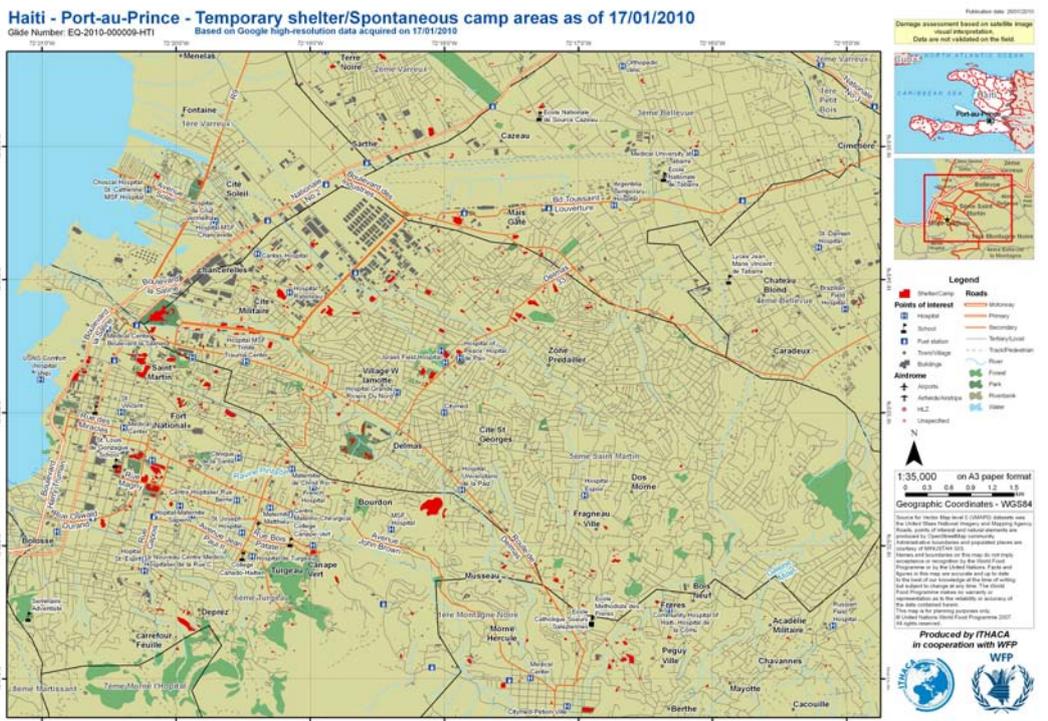


Figura 26 - Terremoto di Haiti, Port-au-Prince. Mappa realizzata da ITHACA con l'ausilio di dati ad alta risoluzione da Google. In rosso sono evidenziate i campi di rifugio temporari al 17 Gennaio 2010.

CAPITOLO 3

IL CASO DI STUDIO: LE ALLUVIONI IN BANGLADESH

3.1 Inquadramento geografico

Il Bangladesh, ufficialmente Repubblica Popolare del Bangladesh, è un paese dell'Asia Meridionale, che spartisce i suoi confini terrestri maggiormente con l'India ad eccezione di un piccolo tratto nell'estremo Sud-Est dove confina con la Repubblica dell'Unione del Myanmar (Birmania).



Figura 27- Mappa del Bangladesh

La popolazione del Bangladesh è stimata intorno ai 150 milioni di abitanti, il che rende il paese il settimo più popoloso del pianeta. Con una superficie di 144.000 km², la densità è superiore ai 1.000 abitanti per km². Ad eccezione di una manciata di città-stato, il Bangladesh ha la più alta densità di popolazione nel mondo. La popolazione è relativamente giovane, con la fascia di età tra 0-25 anni che assomma al 60% della popolazione totale, mentre solo il 3% ha un'età superiore ai 65 anni.

Il Bangladesh si trova nella bassa terminale del sistema fluviale Gange-Brahmaputra, e più precisamente nella regione del delta del Gange. Questo delta è formato dalla confluenza dei fiumi Gange (nome locale Padma o Podda), Brahmaputra (Jamuna o Jomuna), e Meghna e dai rispettivi affluenti. Il Gange si unisce Insieme alla Juana (canale principale del Brahmaputra) e più tardi si unisce con il Meghna prima di sfociare nel Golfo del Bengala. Il terreno alluvionale depositato da questi fiumi ha creato alcune delle più fertili pianure in tutto il mondo. Il Bangladesh ha cinquantasette fiumi transfrontalieri (nella maggior parte dei casi con l'India), rendendo l'acqua una questione politicamente complicata da risolvere.

La maggior parte del territorio del Bangladesh si trova a meno di 12 metri sopra il livello del mare, e si calcola che circa il 50% dei terreni verrebbero inondati se il livello del mare salisse di un metro. (Ali, 1996)

Il punto più alto in Bangladesh viene toccato sulla catena dei Mowdok a 1.052 metri nei Chittagong Hill Tracts nel Sud-Est del paese. Una parte importante del litorale comprende una giungla paludosa, il Sundarbans, la più grande foresta di mangrovie del mondo e la patria di diverse specie di vita animale e vegetale, ivi compresa la tigre del Bengala .

Posto a cavallo del tropico del Cancro, il Bangladesh presenta un clima tropicale con inverni miti da Ottobre a Marzo, ed una stagione calda e umida da Marzo a Giugno. La stagione del monzone dura da Giugno a Ottobre e fornisce la maggior parte delle precipitazioni atmosferiche che cadono sul paese.

Calamità naturali, quali inondazioni, cicloni tropicali, tornado, mareggiate, si verificano quasi ogni anno, e si combinano con i danni provocati dalla deforestazione, dal degrado del suolo e dall'erosione. Si ricorda a questo proposito il disastro del novembre 1970 causato dal ciclone Bhola, nel quale persero la vita oltre 300.000 persone. Altre pesanti inondazioni sconvolsero il paese nel 1991, nel 2004, nel 2007 e quella più attuale risale al 2010, in tutti i casi con gravi perdite umane, villaggi distrutti con migliaia di senzatetto e coltivazioni gravemente sinistrate.

3.2 Le cause delle alluvioni in Bangladesh

Come già visto nel paragrafo precedente, il Bangladesh è uno dei paesi al mondo più densamente popolati e nello stesso tempo è anche uno dei paesi più sensibili alle catastrofi di natura alluvionali. Molte sono le cause sia fisiche, sia antropiche (di cui uno schema è riportato in Figura 28) che rendono tali fenomeni così devastanti.

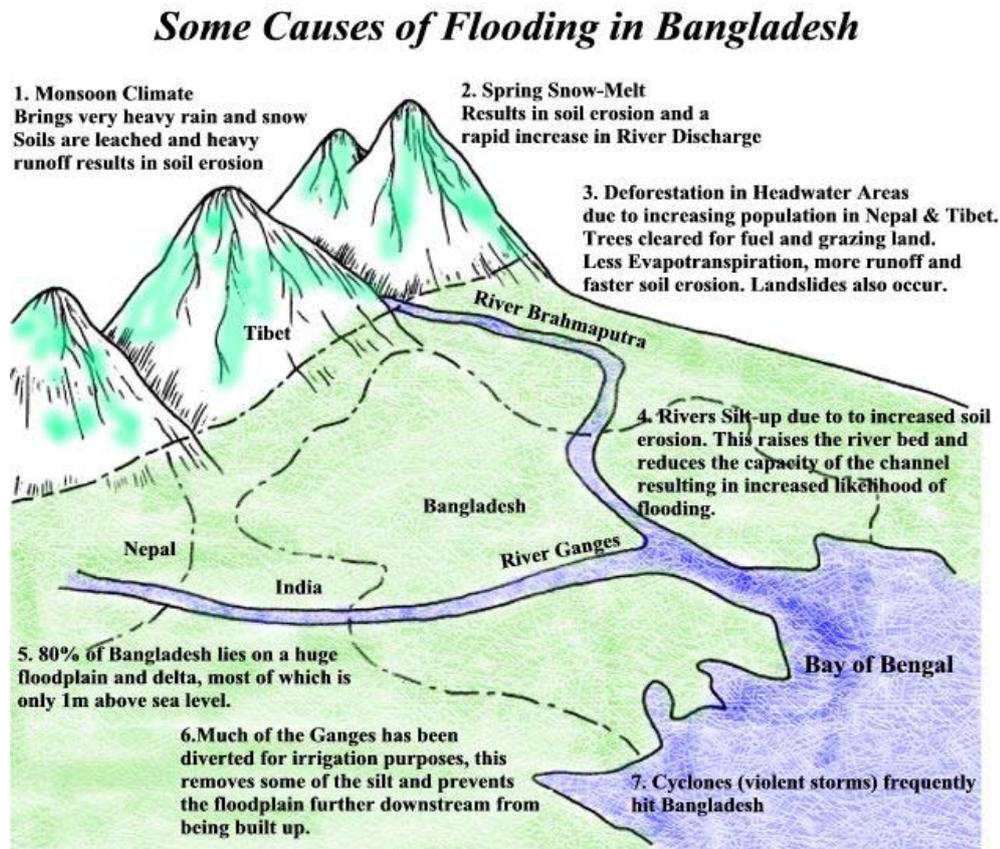


Figura 28- Alcune delle principali cause d'alluvione in Bangladesh (<http://cgz.e2bn.net>)

Le **cause fisiche** delle alluvioni possono essere riassunte nel seguente modo:

- La maggior parte del Paese è costituito da una pianura alluvionale.
- Lo scioglimento della neve dall'Himalaya si svolge in tarda Primavera e in Estate, andando ad ingrossare i numerosi corsi d'acqua aumentando ulteriormente di conseguenza il rischio di alluvione.
- Il 10% della superficie del paese è costituita da laghi e fiumi.
- Il Bangladesh è esposto a forti piogge monsoniche, soprattutto negli altopiani.
- Le tempeste tropicali portano piogge e inondazioni costiere.

- Il 70% della superficie totale è inferiore a 1 metro sopra il livello del mare, come si vede chiaramente in Figura 29, dove vengono evidenziate le zone che sarebbero più esposte ad una variazione del livello del mare.

Sea Level Risks - Bangladesh

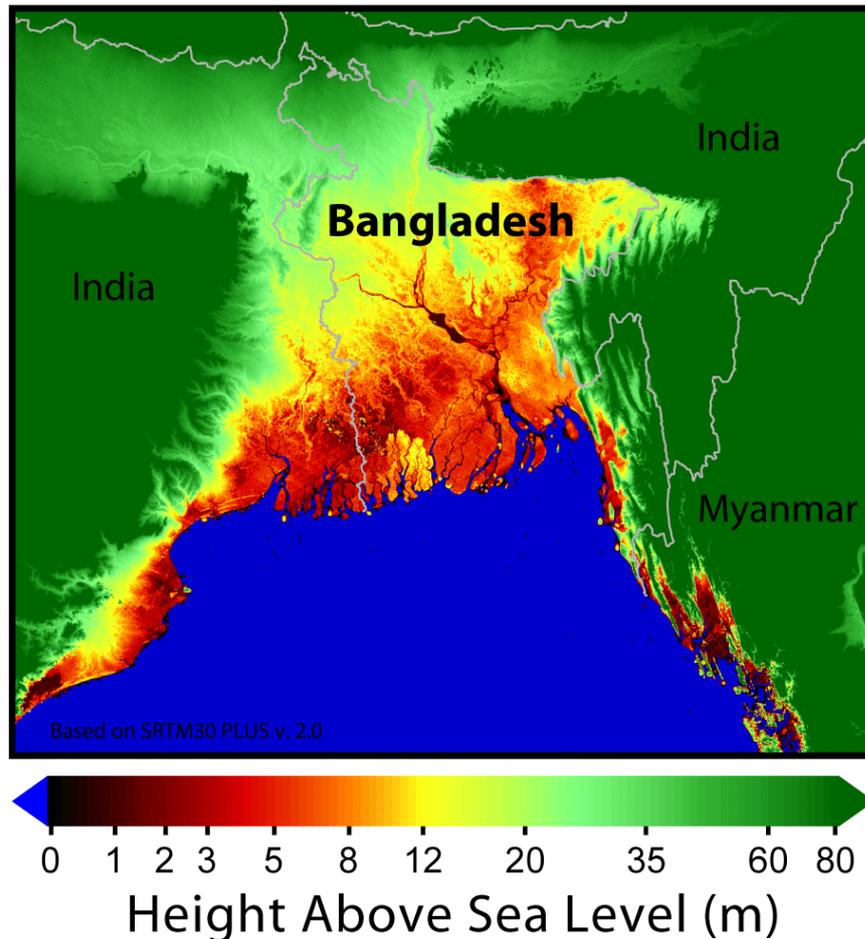


Figura 29-Mappa del livello del mare in Bangladesh (Robert A. Rohde)

Le **cause antropiche** delle inondazioni possono essere :

- La deforestazione in Nepal e sull'Himalaya;
- Il riscaldamento globale è accusato dell' aumento del livello del mare, inoltre ha incrementato lo scioglimento delle nevi e ha portato un aumento delle precipitazioni nella Regione (Litchfield, 2010).
- La costruzione di dighe in India ha aumentato il problema della sedimentazione in Bangladesh.
- Gli argini dei fiumi si trovano in cattivo stato.

- L'aumento della popolazione in Bangladesh ha portato alla costruzione di molti nuovi pozzi con conseguente abbassamento della falda e il conseguente cedimento del terreno rendendo ancora più soggetta il Paese ad alluvioni.

3.3 La natura delle alluvioni in Bangladesh

Il Bangladesh, con i suoi duecentotrenta fiumi, di cui cinquantasette internazionali, ha un sistema idrologico unico. Il regime delle inondazioni stagionali caratterizza, pur se in maniera diversa, tutto il territorio ad eccezione delle zone montuose che ricoprono il 29% della superficie totale della nazione.

Generalmente nel Paese si manifestano quattro tipi di alluvioni:

- *Piene improvvise* che si verificano durante la prima metà di Aprile nella zona di Sud-Ovest;
- *Inondazioni derivanti dalle piogge*, le quali generalmente accadono nella parte Occidentale del Paese e sono in aumento nelle basse zone urbane.
- *Inondazioni dovute allo straripamento dei fiumi* sono le più comuni; le zone sono inondate durante la stagione dei monsoni, lungo il fiume e, in alcuni casi molto al di là delle rive.
- *Alluvioni da mareggiate* che si verificano lungo le zone costiere del Bangladesh, il quale ha una linea costiera di circa 800 km lungo la parte settentrionale del Golfo del Bengala. le zone costiere sono sottoposte a inondazioni di marea da Giugno a Settembre (M.A.H. Pramanik 1992).

Nell'ultimo mezzo secolo si sono verificate almeno otto inondazioni gravi che hanno interessato il 50% della superficie territoriale. La figura in basso presenta una panoramica degli eventi alluvionali nel periodo 1954-2000.

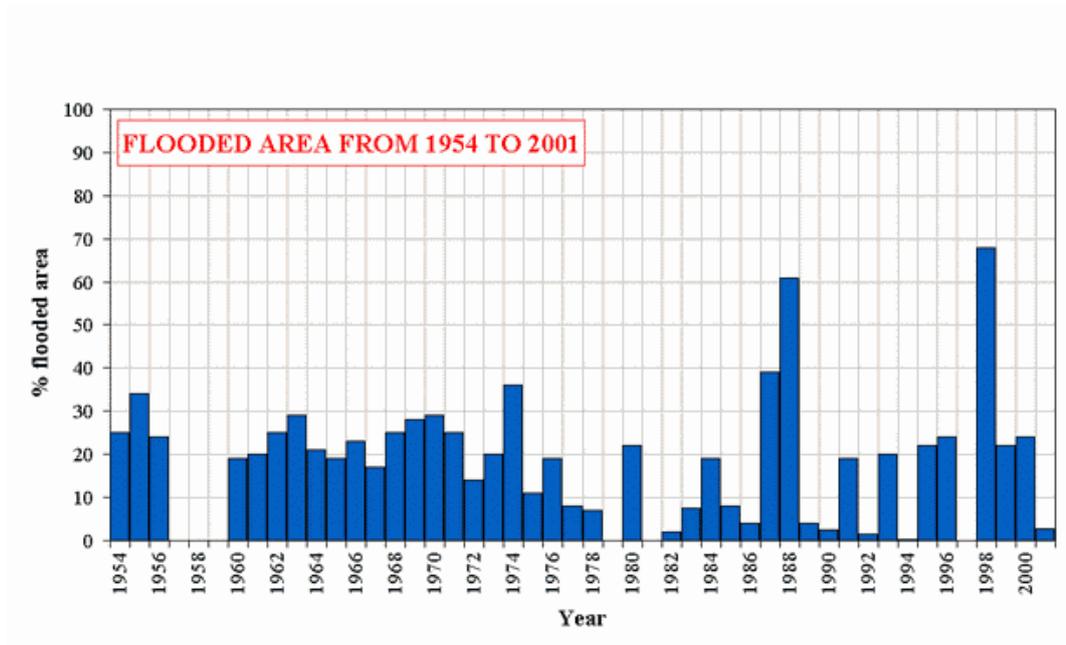


Figura 30 - Grafico che mostra le principali alluvioni avvenute tra il 1954 e il 2000 in funzione della percentuale di territorio inondata

Tali eventi sono per lo più causati dalle forti piogge nei bacini fluviali, infatti quando i livelli d'acqua dei tre maggiori corsi d'acqua salgono contemporaneamente si genera una situazione di estremo rischio alluvione in tutto il paese e la durata di questi eventi eccezionali può andare dai 15 ai 45 giorni. In genere il periodo dell'anno in cui possono avvenire questo tipo di inondazioni coincide con la stagione dei monsoni e cioè da Giugno ad Ottobre (Hossain, 2001).

CAPITOLO 4

LA SPERIMENTAZIONE SUL CASO DI STUDIO

4.1 Descrizione dei dati e il software impiegato

Il presente lavoro di tesi ha come obiettivo quello di dimostrare la valenza dei dati telerilevati nella gestione delle catastrofi naturali e più precisamente nel caso delle alluvioni in Bangladesh (Cap. 3). L'area in esame è stata analizzata attraverso tre immagini satellitari, due ottiche e una Radar: con le immagini ottiche (Landsat 7 e ASTER) si è studiato il particolare evento alluvionale che ha colpito il Paese nel Luglio 2004 e che ha visto interessati quarantuno distretti sui sessantaquattro complessivi, tra i quali la capitale Dhaka; mentre l'immagine Radar (CosmoSkymed) è stata studiata per dimostrarne la validità nell'estrazione dei corpi idrici e quindi valutarne la valenza, anche nel caso di eventuali esondazioni.

La Landsat 7, acquisita il 24 Marzo 2003, è un'immagine multispettrale caratterizzata da sei bande con risoluzione spaziale 30 m, da una banda nell'IR termico con risoluzione 60 metri e dalla banda del pancromatico con risoluzione spaziale 15 m (Cap.1, Tabella 2). L'analisi di questa immagine è stata eseguita allo scopo di avere un inquadramento della zona prima dell'inondazione. La dimensione della scena registrata dal sensore è approssimativamente di 170 km a Nord-Sud e 183 km Est-Ovest (swath).

L'immagine ASTER è stata rilevata il 20 Ottobre del 2004, circa tre mesi dopo l'alluvione. Le immagini ASTER presentano quattordici bande appartenenti ai seguenti tre sottogruppi (Cap.1, Tabella 2):

- Il VNIR (Visible and Near-Infrared Radiometer), tre bande con risoluzione spaziale 15m;

- Lo SWIR (Short Wave Infrared Radiometer), sei bande con risoluzione spaziale di 30 m;
- Il TIR (Thermal Infrared Radiometer), cinque bande con risoluzione spaziale di 90m.

La dimensione dell'impronta a terra dell'immagine è circa 60x60 km.

I dati CosmoSkymed a disposizione consistono in un mosaico di sei strisciate acquisite in modalità ScanSAR con polarizzazione VV, che coprono l'intera nazione del Bangladesh. Le date di acquisizione delle strisciate sono rispettivamente (a partire da Ovest verso Est):

- striscia 1: 11/12/2008
- striscia 2: 30/11/2008
- striscia 3: 22/11/2008
- striscia 4: 29/12/2008
- striscia 5: 10/02/2009
- striscia 6: 04/02/2009.

Il processamento delle immagini è stato eseguito attraverso il software ENVI nella versione 4.8, il quale opera su immagini satellitari in pancromatico, multispettrali, iperspettrali e radar consentendo la loro visualizzazione ed elaborazione a livelli di grigio, a colori o in falso colore; inoltre può gestire sia file in formato raster che vettoriale. Tale software è stato impiegato sull'intero data set sia nella prima fase di analisi dei metadati, sia nella classificazione e nella validazione della stessa.

In seguito sono state effettuate alcune valutazioni in ambiente GIS, confrontando i risultati ottenuti con dati vettoriali, a disposizione, sull'area in esame.

4.2 Pre-processamento dei dati

Al fine di avere una buona conoscenza del territorio, in fase preliminare è stata condotta un'accurata documentazione ed analisi dell'area oggetto di studio, avvalendosi in molti casi del supporto di *Google Earth*, il quale è un potente

strumento di visualizzazione di dati e permette la visione di immagini satellitari da un contesto regionale a quello globale.

In seguito, ogni immagine ha richiesto specifiche pre-elaborazioni, prima di essere sottoposta al processo di classificazione vero e proprio. Nei paragrafi seguenti viene brevemente riassunto il lavoro preliminare condotto sul data set.

4.2.1 La fase preliminare sulle immagini ottiche

Dall'immagine Landsat 7, caratterizzata da otto bande, attraverso la funzione di ENVI, *Layer Stacking*, è stato creato un file multi-banda, contenente tutte le bande di risoluzione 30 m. Tale file, ha permesso di facilitare la visualizzazione dell'immagine nelle diverse bande, in modo da individuare la combinazione migliore che permettesse una buona foto-interpretazione. Si è scelto di lavorare in combinazione 7-4-2, che è meno influenzata dallo scattering atmosferico ed aumenta il contrasto tra coperture differenti. Con questo tipo di visualizzazione si distinguono: in magenta le zone urbane; in verde acceso le coltivazioni vegetate e in fase di crescita; in verde scuro le aree boschive; in blu scuro i corsi d'acqua e le zone paludose; in rosa scuro le aree aride del suolo ed i campi non coltivati; in rosa chiaro la sabbia e gli scavi in ambito urbano. In Figura 31 è riportato un particolare della capitale Dhaka visto con le diverse combinazioni tra bande.



Figura 31- Immagine Landsat 7. Visualizzazione della stessa area della città di Dhaka con diverse combinazioni tra bande; rispettivamente: 3-2-1 (colori naturali); 4-2-1(falsi colori); 7-4-2.

Per consentire un migliore confronto con l'immagine ASTER (post-evento), l'immagine Landsat (pre-evento) è stata opportunamente ridimensionata tramite il comando di ENVI *Resize Data* che permette di effettuare un taglio dell'immagine originale.

Il primo passo effettuato sull'immagine ASTER è stato quello di procedere con l'ortorettifica; il prodotto disponibile, infatti, era nella versione L1A, il quale contiene nei metadati le informazioni di correzione geometrica per permettere la trasformazione dell'immagine originale *path-oriented* in un'immagine in proiezione UTM/WGS84. Tale procedura è stata definita automaticamente con la funzione *Orthorectification*, specifico per le immagini ASTER, del software ENVI, su ognuno dei tre sottogruppi dell'immagine. In seguito all'operazione di ortorettifica, sono stati creati, due *Layer Stacking*, uno ottenuto solo dalle bande del VNIR a 15m e l'altro sommando tutte le quattordici bande (ricampionando l'immagine alla risoluzione di 30m). Anche per l'ASTER, come per la Landsat, sono state studiate le diverse combinazioni tra bande per permettere una migliore foto-interpretazione.

4.2.2 La fase preliminare sui dati Radar

L'immagine CosmoSkymed consiste, come già visto in precedenza, nel paragrafo 4.1, in un mosaico che ricopre l'intera nazione del Bangladesh. Ai fini di questo studio si è scelto di analizzare:

- 1 un'area che va dalla città di Dhaka al Golfo del Bengala, considerando tale regione rappresentativa per l'importanza dei corsi d'acqua presenti, tra i quali il Padma, nome locale per il Gange, che successivamente s'incontra con il Meghna per poi sfociare nell'oceano;
- 2 una zona più a Nord, nel distretto di Sylhet, una delle regioni più caratteristiche del Bangladesh contraddistinta da colline e una vasta pianura alluvionale.

Dal mosaico delle strisciate sono stati ricavati, con lo stesso procedimento impiegato per l'immagine Landsat 7 (Cap.4, par. 4.2.1), i *subset* relativi alle aree di interesse. Essendo le immagini georeferenziate in coordinate geografiche Lat/Lon, è richiesta una riproiezione, tramite il comando *Convert Map Projection* di ENVI, con il quale è stato inserito il nuovo sistema di riferimento per passare al sistema cartografico UTM (zona 46 Nord); inoltre il pixel è stato ricampionato a 30 m.

L'immagine SAR è caratterizzata da un disturbo noto come rumore *speckle*, il quale dà un aspetto granuloso all'immagine che è conosciuto come "salt and pepper". Lo *speckle* è causato dall'interazione tra le microonde retrodiffuse dai diversi oggetti contenuti in ciascun pixel dell'area in esame. L'interazione tra onde è detta interferenza. L'interferenza fa sì che i segnali di ritorno vengano smorzati o amplificati a seconda della fase relativa delle retrodiffusioni che interagiscono, dando luogo a dei pixel scuri o luminosi casualmente distribuiti nell'immagine anche quando il sensore sta osservando una zona piuttosto omogenea. Lo *speckle* è una forma di rumore che degrada la qualità dell'immagine e rende l'interpretazione della stessa più difficoltosa. Per ridurre questo disturbo, si possono applicare dei filtri spaziali all'immagine, i quali sono disegnati per adattarsi alle variazioni locali dell'immagine per appianare i valori, ma contemporaneamente intensificare le linee e i bordi per salvaguardare la chiarezza dell'immagine (Trianni, 2006). Per ridurre il rumore è stato applicato ad entrambi i *subset*, il filtro Gamma (con passo 3x3), il quale è un filtro adattativo (cioè adatta il proprio comportamento alla situazione locale), basato sull'assunzione che l'intensità dell'immagine informativa, priva di rumore, abbia una distribuzione delle intensità di tipo Gamma. In Figura 32 è messo a confronto un particolare della città di Dhaka, rispettivamente senza l'applicazione del filtro e dopo l'uso del filtro adattativo Gamma.

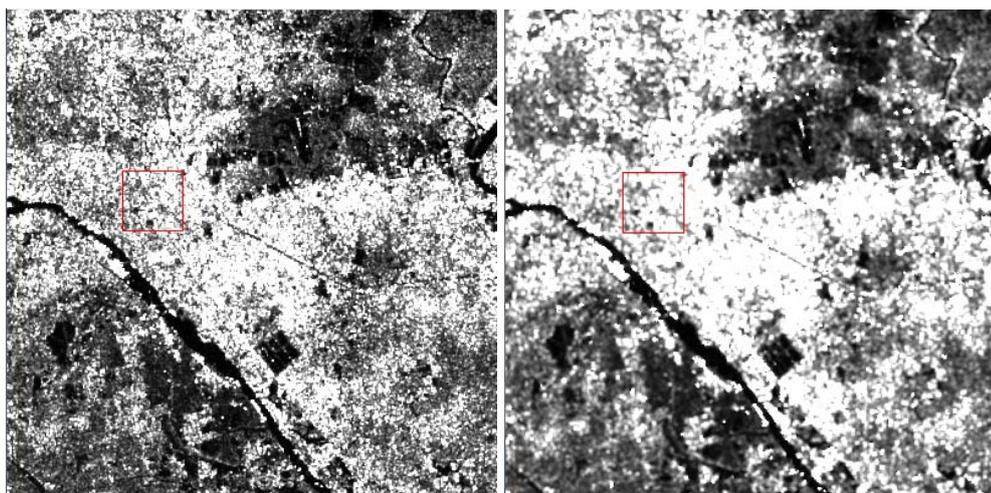


Figura 32- Immagine CosmoSkymed. Particolare della città di Dhaka: a) senza filtro; b) con filtro Gamma 3x3

4.3 La classificazione delle immagini

4.3.1 La classificazione dell'immagini ottiche

La classificazione delle immagini Landsat 7 e ASTER è avvenuta impiegando la classificazione supervisionata (Cap.1, par. 1.4.2) con il metodo della massima verosimiglianza.

Il metodo della Massima Verosimiglianza (“Maximum Likelihood”) sfrutta le caratteristiche statistiche delle classi fino al secondo ordine. Si assume che la densità di probabilità delle classi sia del tipo gaussiano multidimensionale. Di conseguenza, per ciascuna classe, è necessario calcolare sulla base dei campioni di training il vettore medio (baricentro) e la matrice di covarianza. Una data osservazione verrà assegnata alla classe con maggiore probabilità di appartenenza.

4.3.1.1 La classificazione dell'immagine Landsat 7

Per la classificazione dell'immagine Landsat 7 si è deciso di individuare cinque classi di appartenenza:

- La classe *water* per i corsi d'acqua e le zone umide che caratterizzano la città di Dhaka (blu);
- La classe *build-up* per le aree urbane (rosso);
- La classe *sand & excavation* per le zone sabbiose e per gli scavi delle nuove aree residenziali (giallo);
- La classe *crops & vegetation_1* per il terreno brullo e per i campi arati (verde);
- La classe *crops & vegetation_2* per la vegetazione e i campi con coltivazioni verdi (verde).

Per ogni classe, con il comando *ROI Tool* sono state determinate delle aree (Region Of Interest), le quali sono state impiegate, poi come zone di training per la classificazione supervisionata. In Figura 33 è riportata la schermata *ROI Tool* del software ENVI, contenente il nome, il colore, il numero dei pixels e dei poligoni di ciascuna ROI.

In Figura 34 è stato riportato il posizionamento delle singole ROI per le diverse classi sull'immagine Landsat 7 nella visualizzazione 7-4-2.

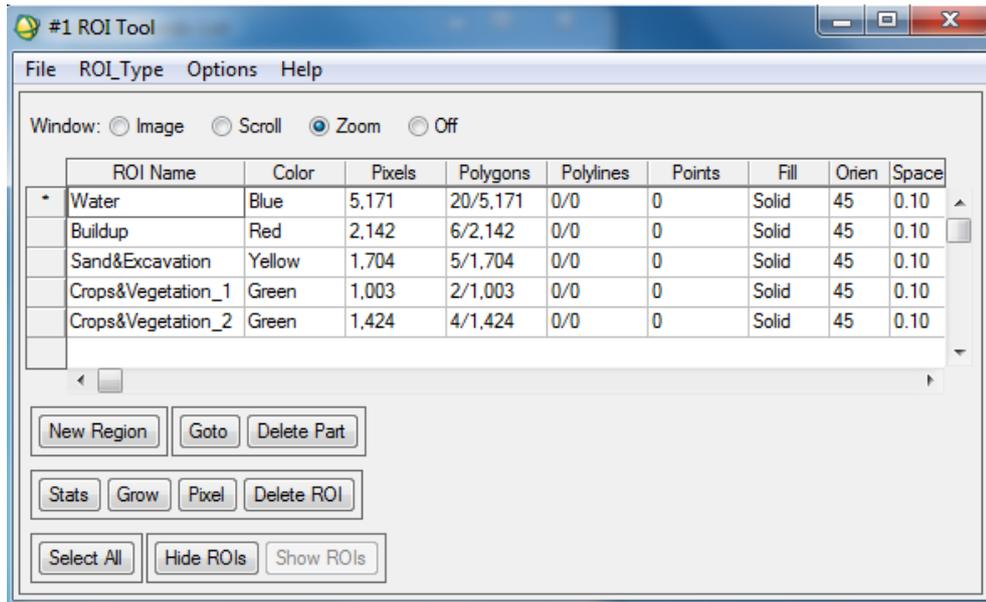


Figura 33- ROI Tool di ENVI in cui sono riportate le cinque classi con il numero di poligoni e quindi di pixel individuate per ognuna

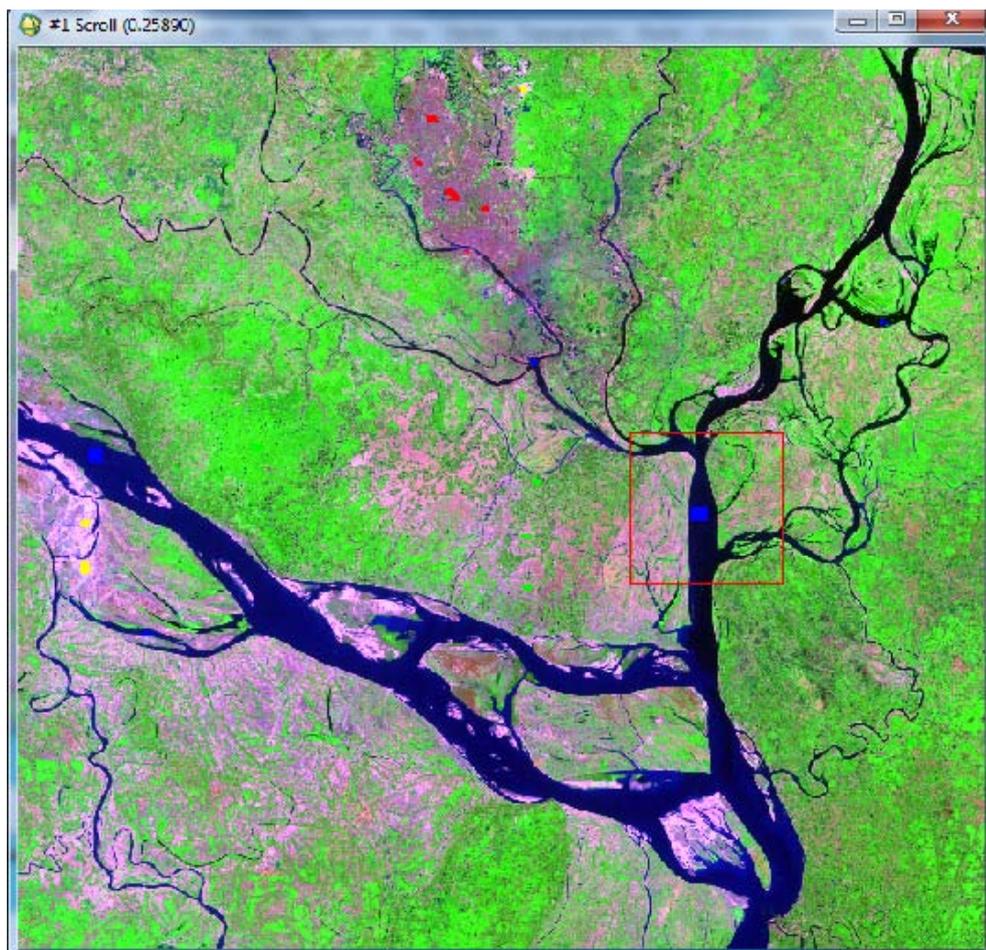


Figura 34- Posizione delle ROI sull'immagine Landsat 7 con visualizzazione 7-4-2.

In seguito all'individuazione delle zone di training si è passati alla classificazione supervisionata, con il metodo della massima verosimiglianza, dell'immagine nelle cinque classi, viste in precedenza. Alla classificazione così ottenuta è stato imposto l'algoritmo di post-classificazione *Majotity Analysis*, il quale elimina i pixel isolati: fissata la dimensione di un kernel, il pixel centrale, viene attribuito alla classe cui appartiene la maggior parte dei pixel presenti nel kernel stesso.

Tale classificazione è riportata nella figura sottostante.

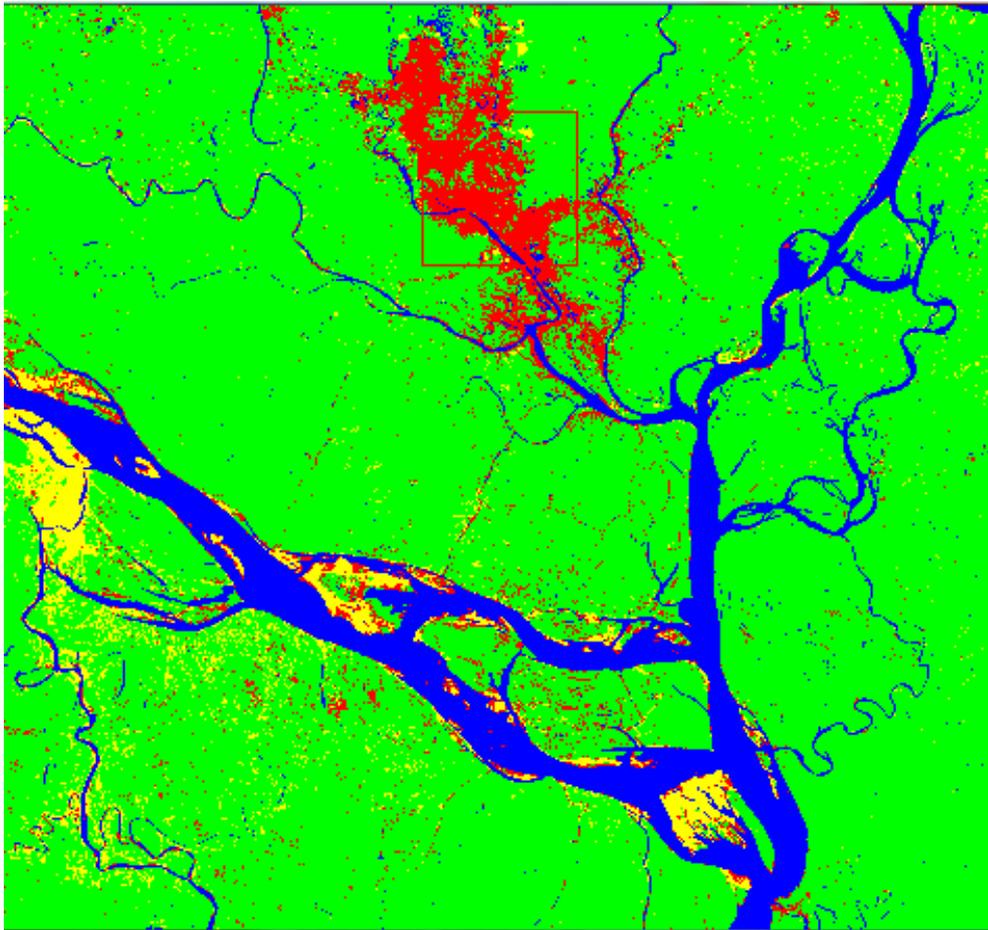


Figura 35- Classificazione supervisionata con il metodo della massima verosimiglianza, in cui si distinguono: in rosso l'urbano; in blu l'acqua; in giallo sabbia e scavi e in verde le coltivazioni e la vegetazione.

Il passo successivo è stato quello di validare la mappa tematica ottenuta. La validazione serve per valutare l'accuratezza del processo di classificazione, dove per accuratezza della mappa tematica s'intende la misura dell'accordo tra la mappa tematica e un riferimento che si assume come corretto: tanto più l'immagine classificata si avvicina o assomiglia al riferimento assunto come

verità, tanto più è accurata. Tale valutazione serve principalmente per due motivi: fornire un'indicazione di affidabilità e capire gli errori eventualmente presenti.

Nello specifico, la qualità della mappa tematica ottenuta dalla classificazione sull'immagine Landsat 7 è stata valutata con un dato di riferimento detto *ground truth*. Visto la mancanza di dati rilevati in loco da assumere come verità a terra, si è operato avvalendosi di *Google Earth*; tale software, infatti, permette, qualora siano disponibili più immagini riprese in anni diversi, scegliere l'epoca da visualizzare. In questo modo si sono visualizzate solo le immagini contemporanee ai dati utilizzati nella classificazione. Per facilitare l'individuazione dei punti "certi", è stata esportata l'immagine Landsat su *Google Earth* attraverso la funzione di ENVI *SPEAR*.

Con questo procedimento sono stati assunti come ROI di riferimento diversi punti per ogni classe. In Figura 36 è rappresentato il *ROI Tool* di Envi nel quale è possibile vedere il nome, il colore di rappresentazione sull'immagine e il numero dei punti (o pixel) assunti come riferimento.

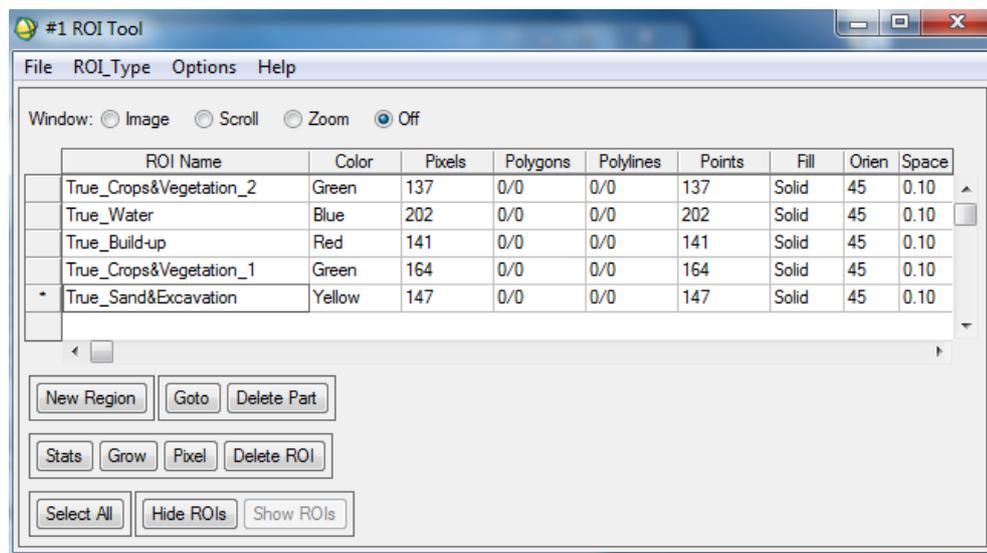


Figura 36- Punti di verità a terra individuati sull'immagine Landsat 7 per ciascuna classe.

Le verità a terra sono state opportunamente associate alle classi specificate dal classificatore, in modo da generare la matrice di errore o di confusione, per la spiegazione della quale si rimanda al capitolo 1 (Cap.1, par. 1.5.4.2). L'accuratezza stimata dalla matrice è pari al 92.9204%.

Dalla matrice, riportata in figura 37, si vede come vi sia confusione tra la classe *sand&excavation* e la classe *crops&vegetation_1*; questo è presumibilmente

dovuto alla stagionalità e alla rotazione delle colture. Altri errori sembrano presenti tra le classi *sand&excavation* e *buildup*, e tra *buildup* e la classe *crops &vegetation_1*, per la discussione dei quali si rimanda al paragrafo 4.4 di questo stesso capitolo. Una buona discriminazione invece la si nota per la classe *crops &vegetation_2*, che rispecchia le aree forestate e le coltivazioni verdi e per la classe *water* che rappresenta, come già visto, i corsi d'acqua e le zone paludose.

Class	Ground Truth (Percent)				
	True_Water	True_Build-up	True_Sand&Excaa	True_Crops&Ve	True_Crops&Ve
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water [Blue]	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Buildup [Red]	0.00	87.23	2.04	1.22	0.00
Sand&Excavation	0.00	3.55	97.28	9.15	0.00
Crops&Vegetat	0.00	4.96	0.00	79.27	0.00
Crops&Vegetat	0.00	4.26	0.68	10.37	100.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Figura 37- Matrice di confusione per la validazione della classificazione dell'immagine Landsat 7 espressa in forma percentuale.

4.3.1.2 la classificazione dell'immagine ASTER

Per la classificazione supervisionata con il metodo della massima verosimiglianza dell'immagine ASTER si è scelto di suddividere la zona in quattro classi di appartenenza, mantenendo pressoché gli stessi nomi e colori delle classi individuate sull'immagine Landsat7 e quindi sono state individuate:

- in rosso l'urbano (*build-up*);
- in blu le zone alluvionate e i corpi idrici (*water*);
- in giallo la sabbia delle aree fluviali e gli scavi delle nuove aree residenziali (*Sand&Excavation*);
- in verde la vegetazione e i campi coltivati, che rispetto all'immagine Landsat sono stati accorpati in un'unica classe, vista la difficoltà d'indagine presente in questo caso dovuta alla presenza di un'estesa zona alluvionata (*Crops&Vegetation*).

Per ogni classe sono state individuate poi le zone di training (ROI), delle quali in figura 38 si possono leggere il nome che individua ciascuna regione, il colore che la rappresenta, il numero dei poligoni e dei pixel che la compone. La posizione delle regioni d'interesse, sull'immagine ASTER in falsi colori, è rappresentata in Figura 39.

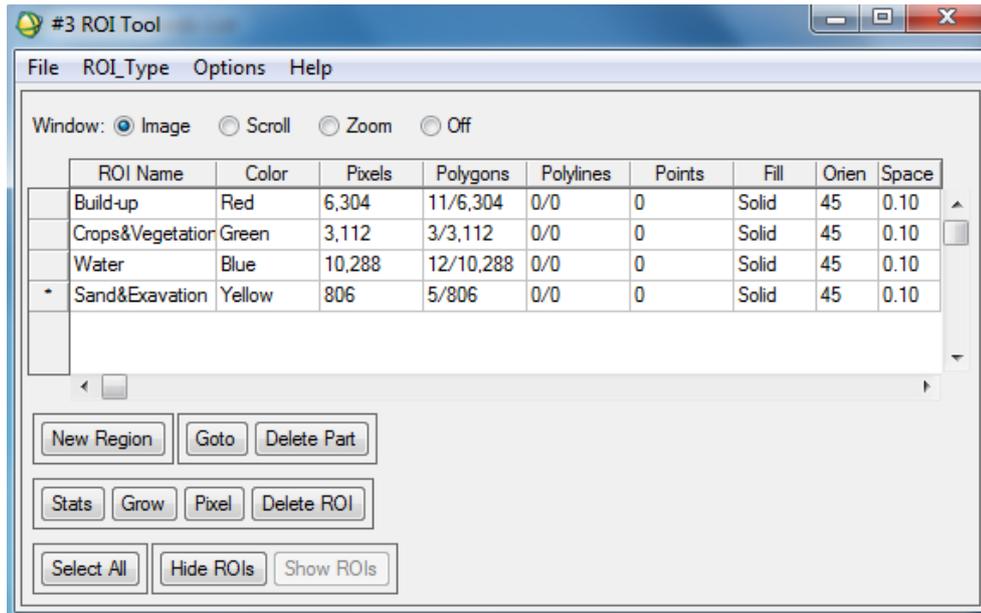


Figura 38- ROI Tool di ENVI in cui sono riportate le quattro classi con il numero di poligoni e quindi di pixel individuate per ognuna.

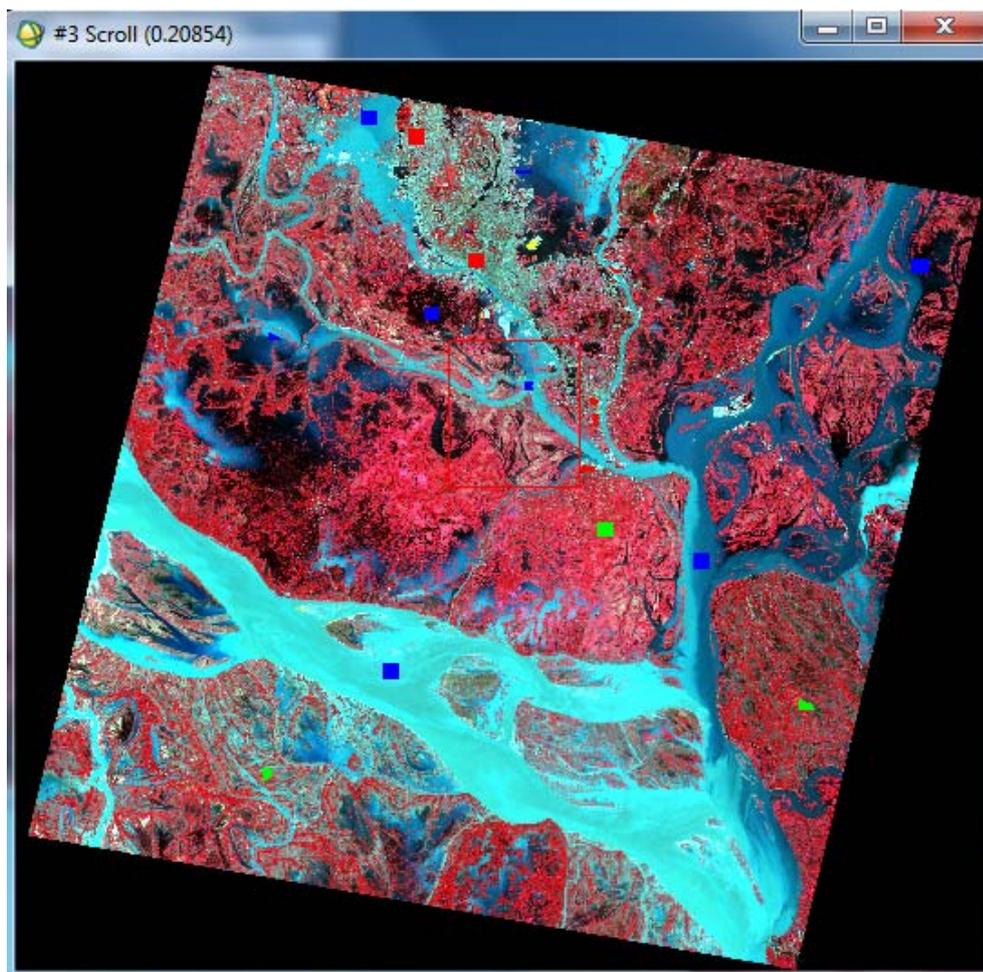


Figura 39- Posizione delle ROI sull'immagine ASTER con visualizzazione in falsi colori.

La classificazione dell'immagine ASTER si è presentata più problematica rispetto a quella effettuata sull'immagine Landsat, in quanto su di essa è riconoscibile una vasta zona alluvionata.

Una volta individuate le ROI per ciascuna classe, infatti, sono state condotte disparate prove di classificazione sui diversi file multi-banda ricavati dalla funzione di ENVI *layer stacking*. Questo per limitare l'effetto della mancata discriminazione tra alcune classi ed in particolare tra l'urbano e le zone di detrito fluviale, problema che verrà approfondito più avanti (Cap.4, par. 4.4).

Dalle varie analisi effettuate si è notato come la migliore classificazione è stata ottenuta considerando oltre alle bande del VNIR anche quelle del TIR, il quale è sensibile all'energia termica emessa dalle superfici.

La classificazione così ottenuta è riportata in Figura 40 in cui si nota, ancora a distanza di tre mesi, la grande devastazione dell'alluvione che ha colpito il Bangladesh nel Luglio 2004.

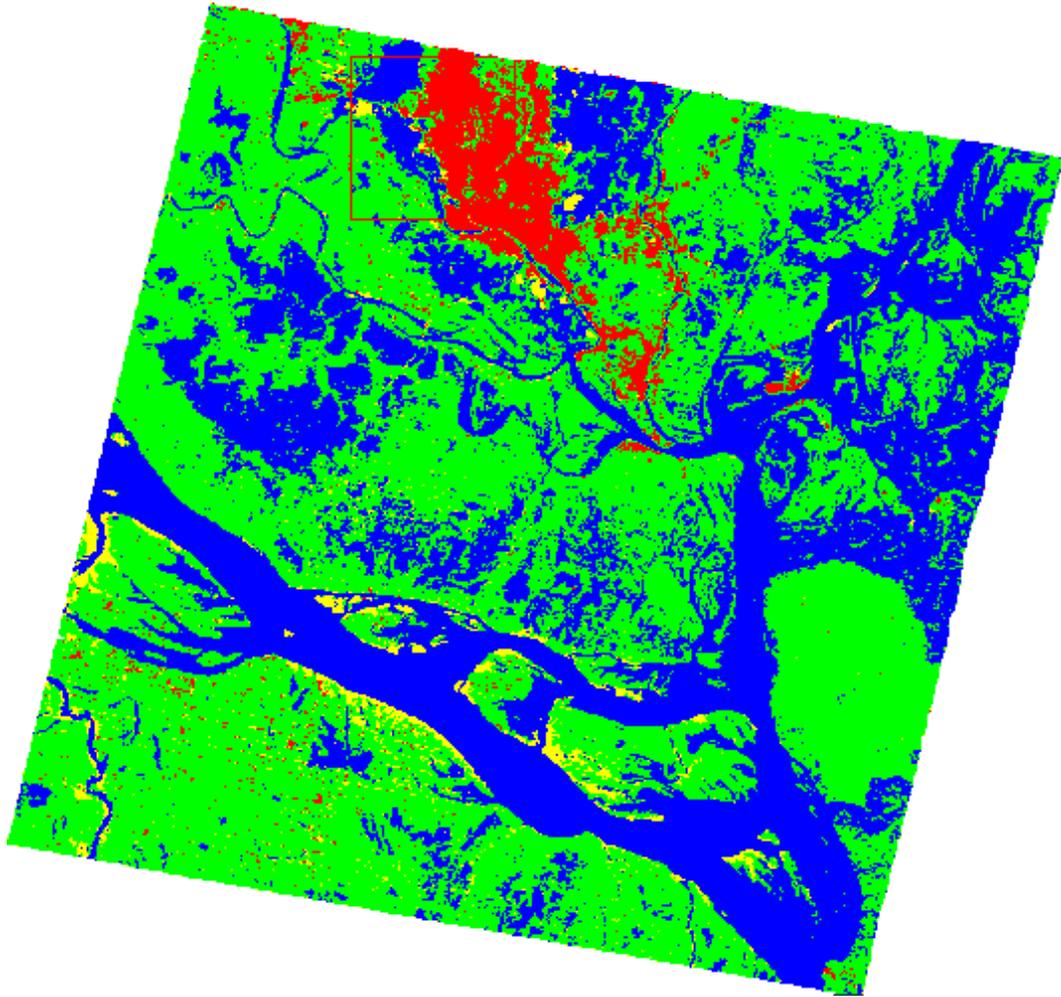


Figura 40- Classificazione supervisionata con il metodo della massima verosimiglianza, in cui si distinguono: in rosso l'urbano; in blu i corpi idrici e le aree inondate; in giallo sabbia e scavi e in verde le coltivazioni e la vegetazione.

La validità della mappa tematica ricavata dalla classificazione dell'immagine ASTER è stata riconosciuta solo dal punto di vista qualitativo, in quanto la mancanza di dati rilevati in loco contemporanei all'immagine e la situazione critica ripresa da quest'ultima hanno reso la determinazione di punti di riferimento da assumere come verità a terra, difficile e incerta.

4.3.2 La classificazione dell'immagine CosmoSkymed

Le immagini Radar non risentono della copertura nuvolosa, tipica nel caso delle alluvioni dovute alle forti piogge, come accade nelle zone monsoniche. Per questa peculiarità si prestano molto bene all'indagine del territorio mentre l'inondazione è in atto, fornendo così un valido supporto alle operazioni umanitarie di soccorso e successiva ricostruzione.

Con lo scopo di dimostrare la validità del Radar nell'estrazione dell'idrografia si è lavorato sull'immagine CosmoSkymed con il metodo *Decision Tree*, il quale è uno strumento per una classificazione gerarchica costituito da una serie di decisioni binarie per determinare la corretta categoria per ogni pixel. Tale metodo presenta appunto una struttura ad albero, in cui ogni nodo interno denota un test su un attributo; gli archi uscenti rappresentano i risultati del test ed ogni nodo foglia rappresenta un'etichetta di classe (Melis e Piloni, 2011).

L'obiettivo è quindi quello di estrarre i corpi idrici e le zone umide presenti su entrambi i *subset* ricavati dall'immagine CosmoSkymed, già in precedenza descritti (Cap.4 par.4.2.2).

Sono state individuate due grandi classi:

- una classe per l'acqua, rappresentata in blu (*Water*);
- una classe per tutte le altre aree, alla quale è stato attribuito il colore bianco (*No Water*).

Per la discriminazione delle due classi è stato assegnato come valore di soglia di DN 0.028 (individuato effettuando varie prove), al di sotto del quale tutto viene considerato appartenente alla classe *water*, mentre tutti i valori maggiori di tale valore saranno attribuiti alla classe del *no water*.

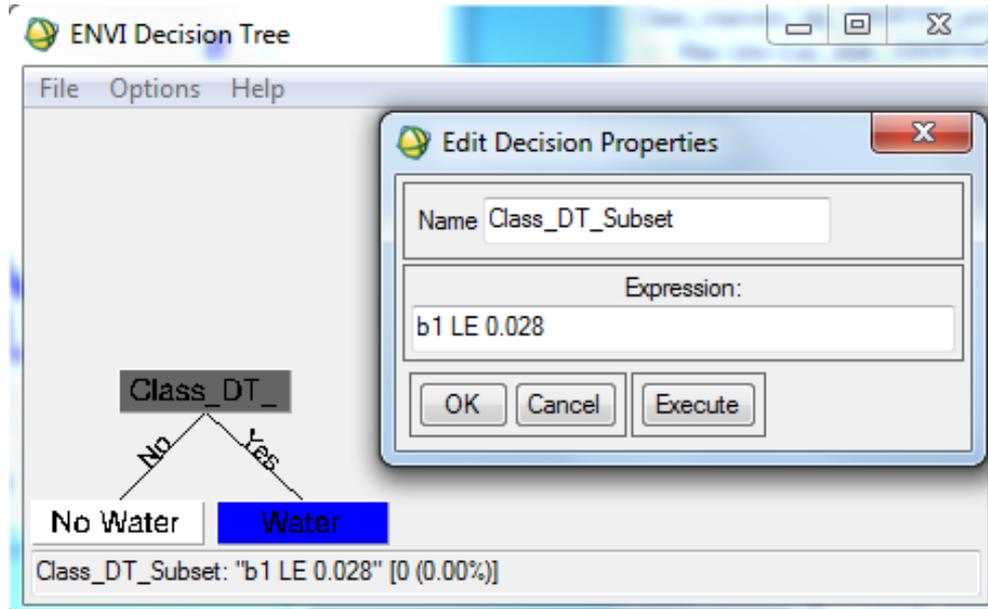


Figura 41- Metodo Decision Tree di ENVI in cui è in primo piano la regola assegnata per la divisione dei pixel nelle due classi Water in blu e No water in bianco

Una volta assegnata la regola il programma esegue la classificazione sull'immagine attribuendo ciascun pixel ad una delle due classi. Quello che si ottiene da questa classificazione è una mappa tematica che ha l'obiettivo di mettere in risalto l'idrografia della zona presa in esame. A tale mappa è stato applicato poi l'algoritmo di post-classificazione *Majority Analysis*, per eliminare gli eventuali pixel isolati attribuiti ad una classe anziché all'altra.

Questo metodo è stato applicato ad entrambi i *subset* considerati..

La mappa tematica, determinata sul *subset* che va da Dhaka al Golfo del Bengala, è riportata in Figura 42, nella quale è stato inserito il riferimento geografico del distretto di Dhaka, evidenziato in rosso.

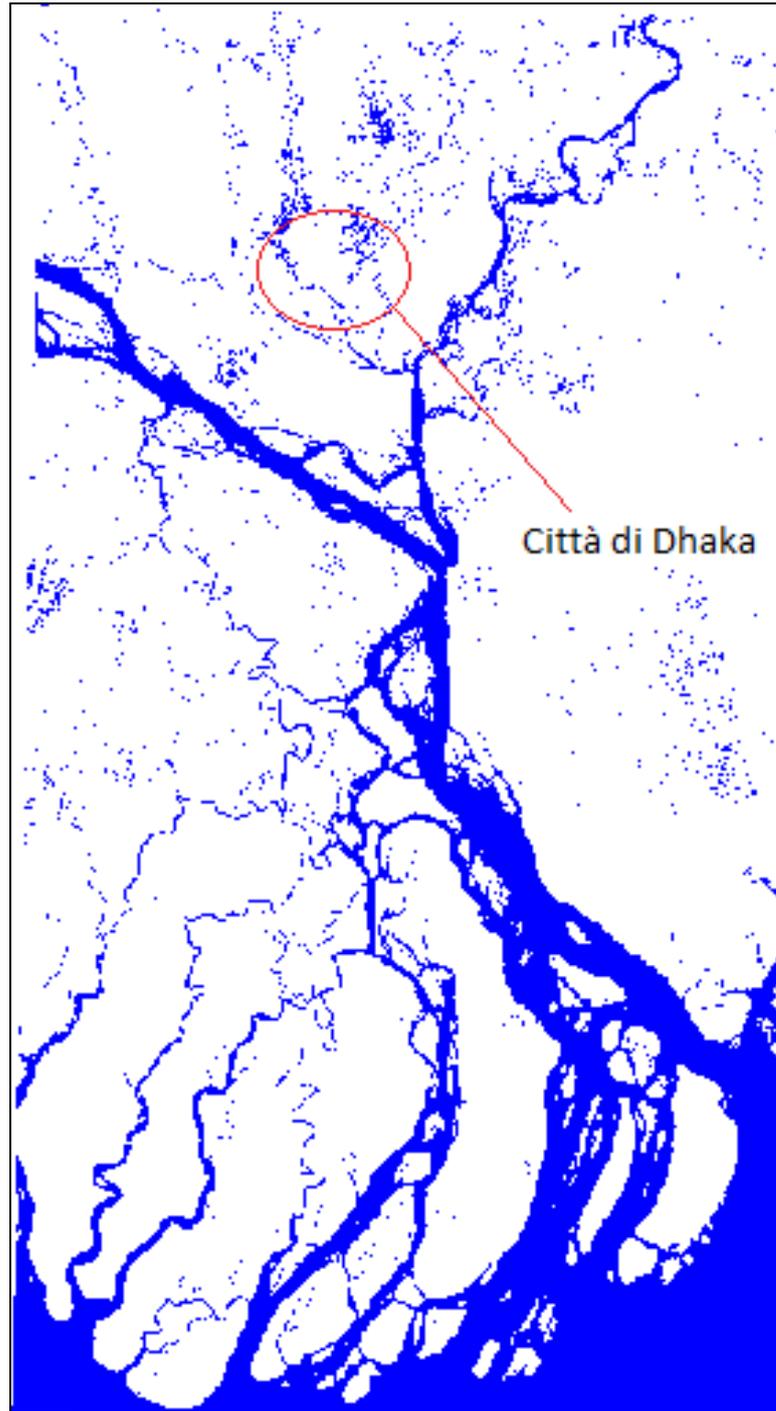


Figura 42- Classificazione con il metodo del Decision Tree dell'immagine CosmoSkymed, in due classi: water in blu e non water in bianco

Il particolare delle zone umide che si trovano a Nord-Est e a Nord Ovest della capitale è riportato nella figura sottostante, in cui vi è un confronto tra l'area, rappresentata nell'immagine CosmoSkymed alla quale è stato applicato il filtro adattativo gamma e la mappa tematica ricavata dalla classificazione da essa prodotta.

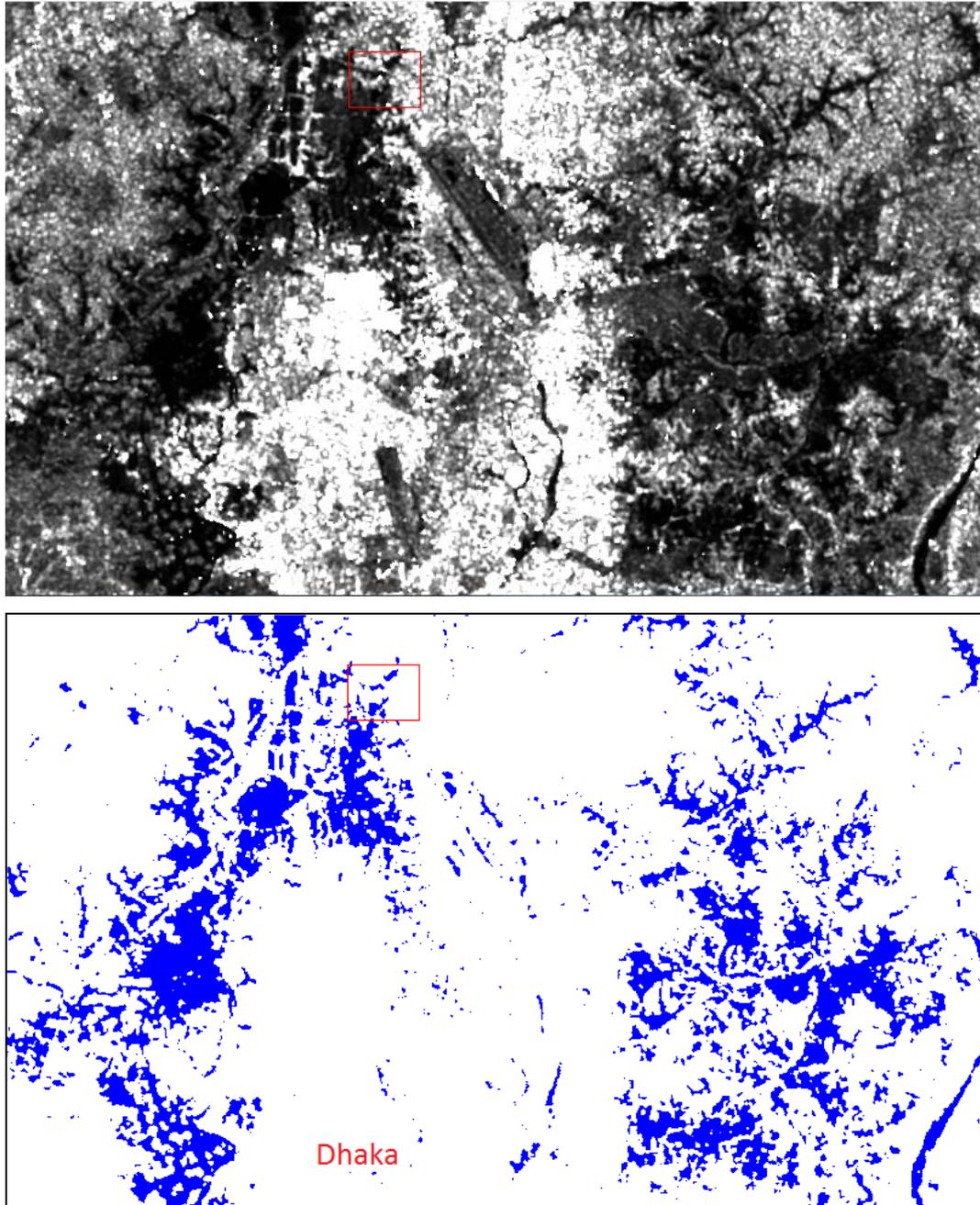


Figura 43- Il particolare delle zone umide che si trovano a Nord-Est e a Nord Ovest della capitale visto rispettivamente dall'immagine CosmoSkymed e dalla mappa tematica da essa ricavata.

La validazione della classificazione ottenuta su questo *subset*, come per l'immagine ottica Landsat 7, già trattata in precedenza (Cap. 4, par. 4.3.1.1), è stata eseguita avvalendosi del supporto del software *Google Earth*, con l'ausilio del quale sono stati individuati i punti di riferimento da assumere come certi. Sono stati individuati sull'immagine indagata 300 punti per la classe *water*. In Figura

44 è riportato il *ROI Tool* di ENVI, in cui si denotano le caratteristiche dei punti assunti come verità a terra.

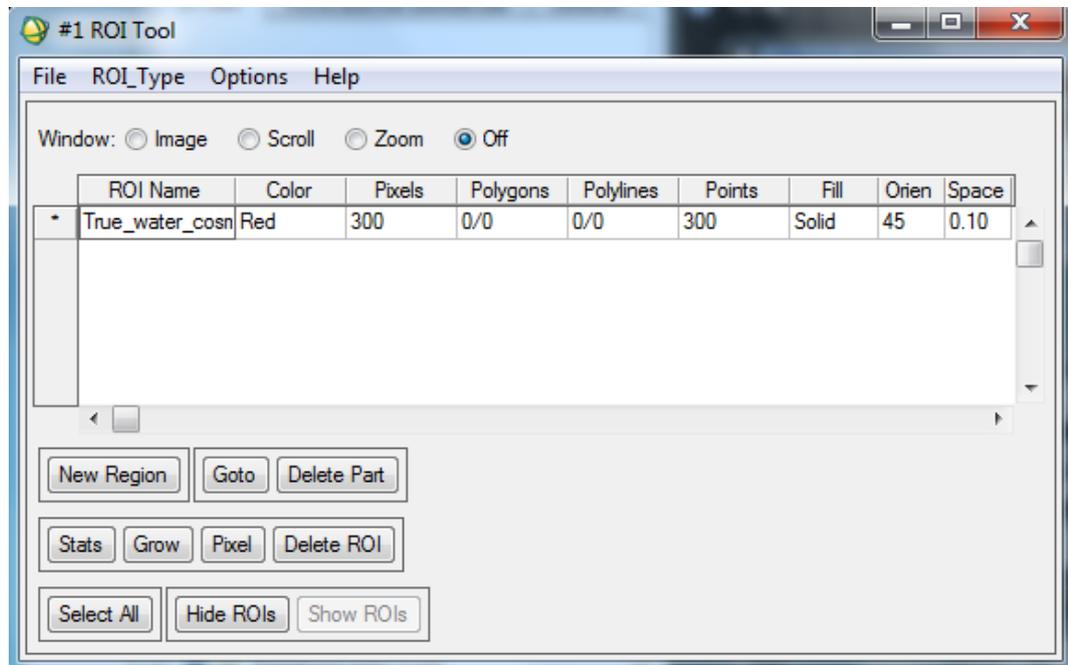


Figura 44 - Punti di verità a terra individuati sull'immagine CosmoSkymed per la classe Water.

Una volta individuate le ROI di riferimento, è stata generata, con lo scopo di valutare la bontà della classificazione, la matrice di confusione andando a combinare la classe *water* con quella assunta come verità a terra; tale matrice è riportata in Figura 45.

L'accuratezza a cui si è giunti è pari all'89,67%; da ciò si deduce che pur presentando un'accuratezza elevata, vi sono alcune aree con presenza d'acqua che non vengono classificate come tali. Le motivazioni di quest'errore di confusione verranno trattate in seguito (Cap.4, par. 4.4).

Class	Ground Truth (Percent)	
	True_water_co	Total
No Water	10.33	10.33
Water	89.67	89.67
Total	100.00	100.00

Figura 45 - Matrice di confusione per la validazione della classificazione dell'immagine CosmoSkymed espressa in forma percentuale.

La classificazione del subset della zona nel distretto di Sylhet è riportata in Figura 46.

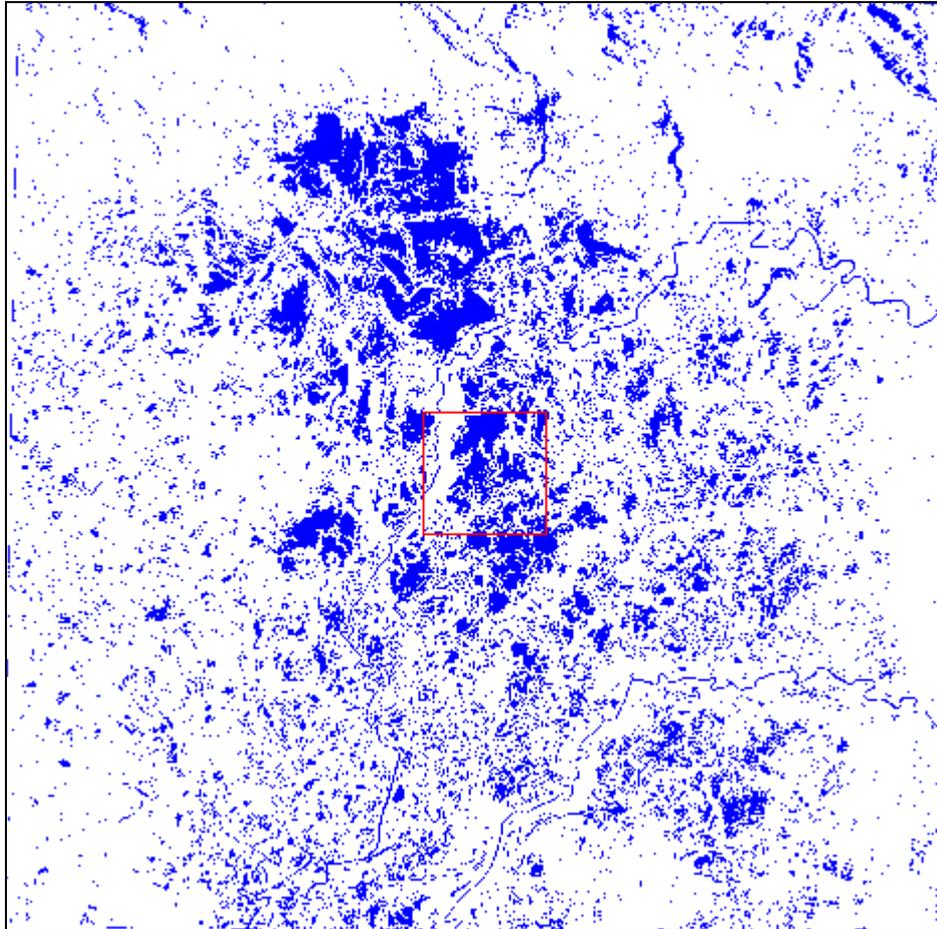


Figura 46 - Classificazione con il metodo del Decision Tree del subset del distretto di Sylhet dell'immagine CosmoSkymed, in due classi: water in blu e non water in bianco

La validazione di questa mappa tematica non è stata eseguita, in quanto di questa zona non erano disponibili dati contemporanei da assumere come verità a terra.

Nella fascia in alto di tale mappa tematica sono presenti errori di assegnazione dell'ombra dei rilievi alla classe *water*. Tali errori e la relativa correzione verranno trattati più avanti nel paragrafo 4.5.

4.4 I problemi riscontrati nella classificazione delle immagini ottiche

Dalla classificazione delle immagini ottiche, vista nel capitolo precedente, si è potuto notare come vi siano delle zone di confusione tra l'urbano (in rosso nella

classificazione) ed il detrito fluviale (in giallo). Infatti, soprattutto sull'immagine Landsat7, alcune zone risultano essere urbanizzate, anche se in realtà, da un confronto con le riprese dell'area dell'Aprile 2003 effettuato su *Google Earth*, non lo sono, come si può notare in Figura 47.



Figura 47- Particolare dell'isolotto presente all'unione del fiume Padma con il Meghna; confronto tra Google Earth, l'immagine Landsat 7 (visualizzazione 7-4-2) e la classificazione di quest'ultima.

Tale fenomeno è maggiormente visibile se si mettono a confronto le firme spettrali di due pixel appartenenti rispettivamente alla zona fluviale (Figura 48) e all'urbano (Figura 49), in quanto si nota subito come i profili spettrali siano pressoché identici e quindi l'algoritmo di classificazione ha molte difficoltà nel discriminare le due aree.

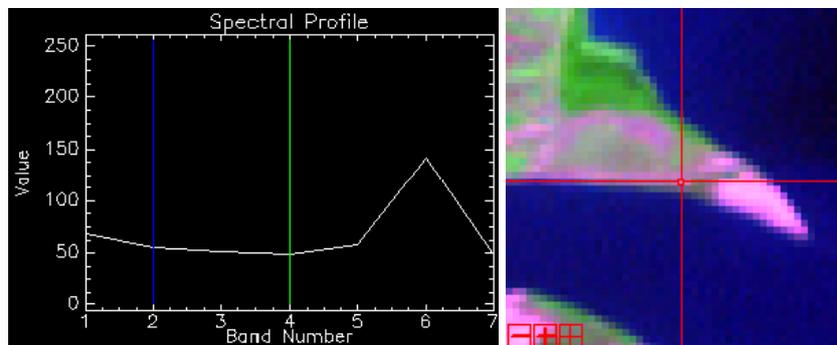


Figura 48- Firma spettrale di un pixel vicino al fiume e localizzazione di tale punto

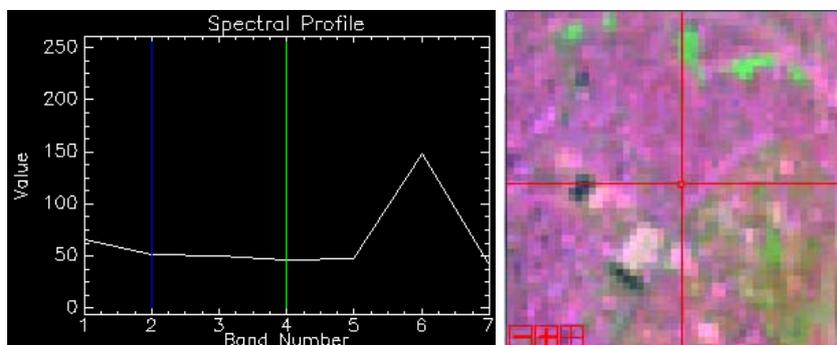


Figura 49- Firma spettrale di un pixel della zona urbana della città di Dhaka e localizzazione di tale punto

Una spiegazione a questo problema si potrebbe trovare nel fatto che, verosimilmente, il materiale presente lungo i fiumi costituisce il principale inerte per la costruzione delle abitazioni, deduzione che può avvalersi del fatto che molti mattonifici si trovano sulle rive dei corsi d'acqua (Figura 50).



Figura 50- Immagini estratte da Google Earth: particolare di alcuni mattonifici e particolare di zona urbanizzata (periferia di Dhaka)

Inoltre, essendo un paese in via di sviluppo, soprattutto nelle zone rurali, ma anche in percentuale minore nelle città, vi è la presenza di molte capanne (Katcha) costruite con fango, paglia e bambù, mentre il resto delle abitazioni consiste in edifici interamente in mattoni (pucca) oppure in mattoni e lamiera o eternit (semipucca).

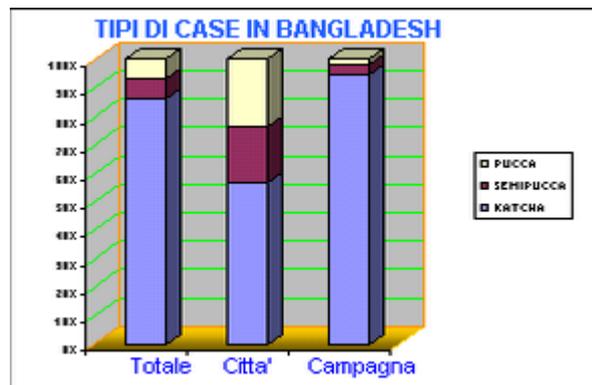


Figura 51- Grafico delle tipologie di abitazioni in Bangladesh (dati riferiti al 2001) (<http://www.cernuscoinsieme.it>)

Per ovviare al problema di confusione tra classi si è voluto dimostrare, nella classificazione dell'immagine ASTER, dopo numerose prove sulle bande del visibile e del vicino infrarosso (VNIR), come tale fenomeno si riduca notevolmente includendo nella classificazione le bande del termico (TIR). Un confronto tra l'area fluviale (da *Google Earth*) e il particolare della stessa zona

preso dalle classificazioni condotte rispettivamente solo sulle bande del VNIR (15m) e sul VNIR e il TIR è raffigurata in Figura 52, in cui si nota l'errore che sarebbe stato commesso se si fosse considerato solo il sottogruppo del VNIR: risulta, infatti, urbanizzata (in rosso) l'intera area presa come esempio, mentre in realtà, come si evince dal primo fotogramma, questa è destinata a campi e presenta aree di deposito fluviale.

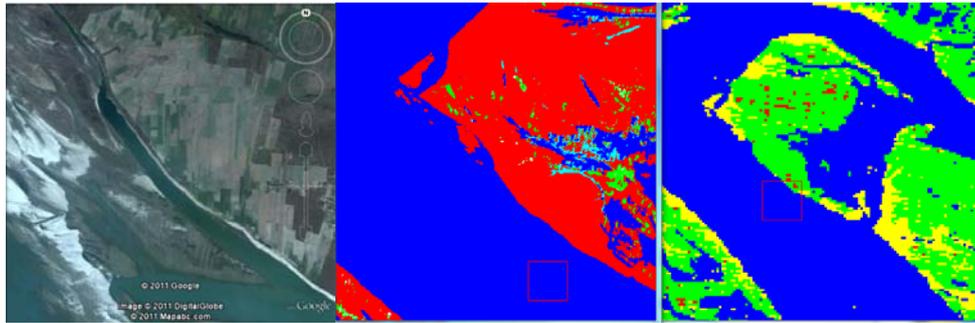


Figura 52- Confronto tra la stessa area vista da Google Earth, classificazione supervisionata solo sulle bande del visibile e classificazione ottenuta considerando anche le bande del termico

La complicazione alla quale si va incontro usando le bande del termico è la perdita di finezza, in quanto il sottogruppo del TIR è stato ricampionato a 30 m dai 90 m della sua risoluzione iniziale. Tuttavia, visto che lo scopo del lavoro di questa tesi è quello di determinare le aree alluvionate a media scala, tale perdita di dettaglio risulta accettabile.

Le bande del termico presentano un difetto, visibile soprattutto nella zona in basso dell'immagine, costituito dalla presenza di righe nella direzione di swath, che sono più o meno visibili a seconda della banda che viene inclusa nella visualizzazione. Tale problema si traduce nella classificazione come un errore di attribuzione del rumore alla classe *Sand & Excavation*, come si nota dal confronto tra il particolare dell'immagine visualizzato con la combinazione tra bande del TIR 13-12-11 e la classificazione della medesima area in figura 53. Nonostante le diverse prove di classificazione e l'applicazione degli algoritmi di post-classificazione (*Majority Analysis*) non si è riusciti a migliorare il risultato in quest'area. La classificazione resta comunque utile per l'analisi delle aree che maggiormente hanno subito la devastazione dell'evento alluvionale.

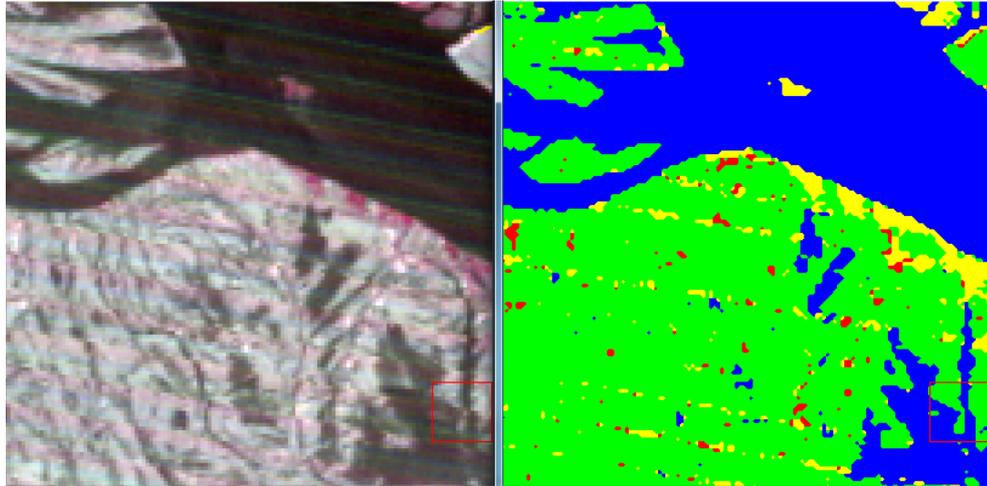


Figura 53 - Confronto tra il particolare dell'immagine visualizzato con la combinazione tra bande del TIR 131211 e la classificazione ottenuta sulla medesima area

4.5 I problemi nella classificazione dell'immagine CosmoSkymed

Uno dei problemi riscontrati nella classificazione dell'immagine Radar riguarda la perdita d'informazione che si ha in alcune zone; infatti i piccoli corsi d'acqua a volte non vengono affatto rilevati oppure perdono di dettaglio, come si può vedere nella figura sottostante, in cui sono stati messi in paragone la stessa area rispettivamente rilevata da *Google Earth*, dall'immagine CosmoSkymed e dalla classificazione da essa ricavata.

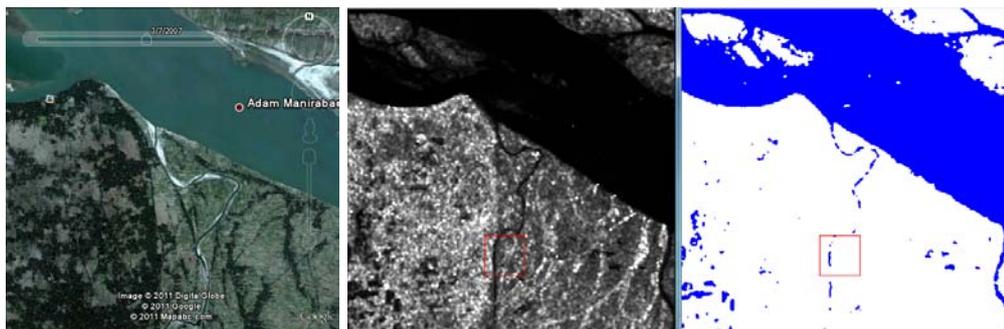


Figura 54- Confronto tra Google Earth, immagine CosmoSkymed e classificazione su di una area presa come esempio

Una spiegazione di tale fenomeno deriva dal fatto che lavorando ad una risoluzione spaziale di 30 m gli oggetti di dimensioni minori non riescono ad essere discriminati dal classificatore in maniera adeguata. Infatti, affinché un

oggetto omogeneo sia osservabile, la sua dimensione deve essere uguale o più grande della cella di risoluzione; se al contrario è più piccolo di questa, non può essere identificato, per cui sarà registrata la luminosità media di tutti gli oggetti in questa cella di risoluzione.

La classificazione del *subset* riguardante la zona del distretto di Sylhet, inoltre, ha dimostrato che la presenza di rilievi montuosi rappresenta per l'immagine SAR un limite. Le zone d'ombra, infatti si presentano di colore scuro e quindi vengono individuate dal classificatore come superficie acquosa. In figura è riportato un particolare dell'immagine CosmoSkymed e della classificazione con il metodo del *Decision Tree* della regione al confine con l'India, in cui si è evidenziato in rosso, la zona d'ombra classificata come *water*.

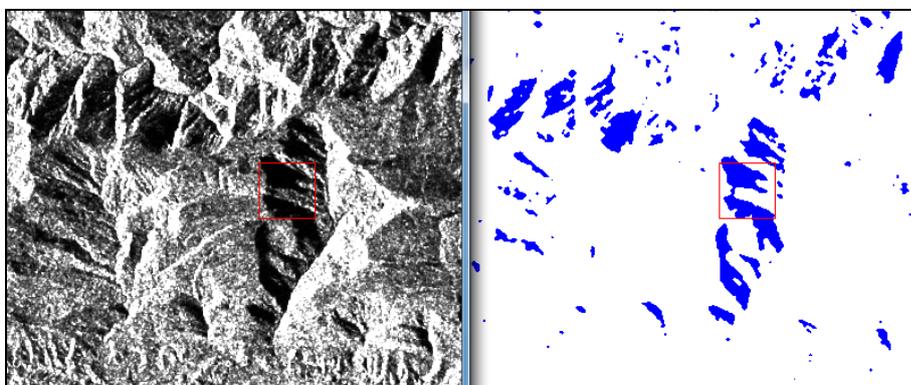


Figura 55- Confronto tra immagine CosmoSkymed e classificazione da essa derivata. In rosso viene evidenziato l'errore che il classificatore compie destinando alla classe water la zona d'ombra del rilievo montuoso.

La correzione di quest'errore è stata effettuata con l'ausilio dei dati di elevazione SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) della zona, disponibili sul sito <http://srtm.csi.cgiar.org/>, con risoluzione 90 m. Con tali modelli di elevazione è stato creato un mosaico, con la funzione di *ENVI Mosaicking* e successivamente è stata creata la mappa delle pendenze (*slope*) con *Topographic Modeling*. Una volta ricavato tale dato è stato riproiettato nel sistema di riferimento UTM/WGS84 ed è stato realizzato un *Layer Stacking* con l'immagine CosmoSkymed della stessa area, ricampionando i pixel a 30 m. A questo punto è stato creato un nuovo albero decisionale per la classificazione con il metodo del *Decision Tree*, al quale è stata aggiunta, rispetto al precedente, riportato in Figura 41, prima della regola di classificazione *water/no water*, una nuova norma per discriminare le superfici in pendenza, tipiche delle zone montuose, sulla banda

dello *slope* . Come valore di soglia è stato impiegato il numero 2,5, ritenuto dopo varie prove, adatto a mascherare tutte quelle superfici in pendenza che andavano ad inficiare la classificazione delle zone acquose. L'albero decisionale impiegato per la classificazione dell'immagine CosmoSkymed è riportato nella figura sottostante.

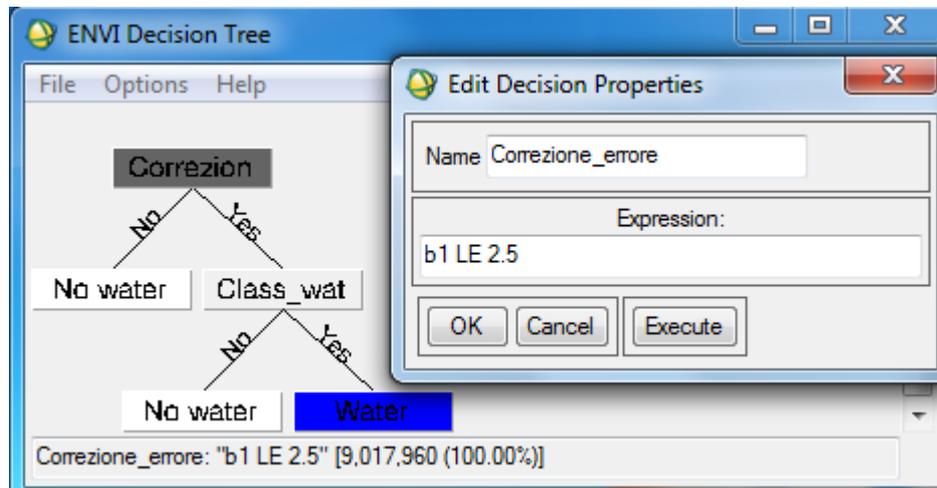


Figura 56 - Metodo Decision Tree di ENVI in cui è in primo piano la regola per discriminare le superfici in pendenza.

La classificazione così ottenuta, riportata in Figura 57, vede la zona suddivisa, come prima, in due classi: *water* (in blu) e *no water* (in bianco), ma nella classe *no water* sono state incluse anche le zone con pendenza superiore al 2.5% che prima creavano confusione nell'assegnazione delle classi. Sempre in Figura 57 è stata evidenziato in rosso la correzione dell'errore già rappresentato in figura 55.

Per sottolineare ulteriormente il risultato di questa correzione, che ha portato ad una notevole riduzione del problema, in figura 58 è stato riportato un dettaglio in cui si vede la stessa area ripresa rispettivamente: dall'immagine CosmoSkymed (a); dalla classificazione in cui vi è l'errore di assegnazione delle zone d'ombra alla classe *water* (b) e dalla classificazione corretta (c).

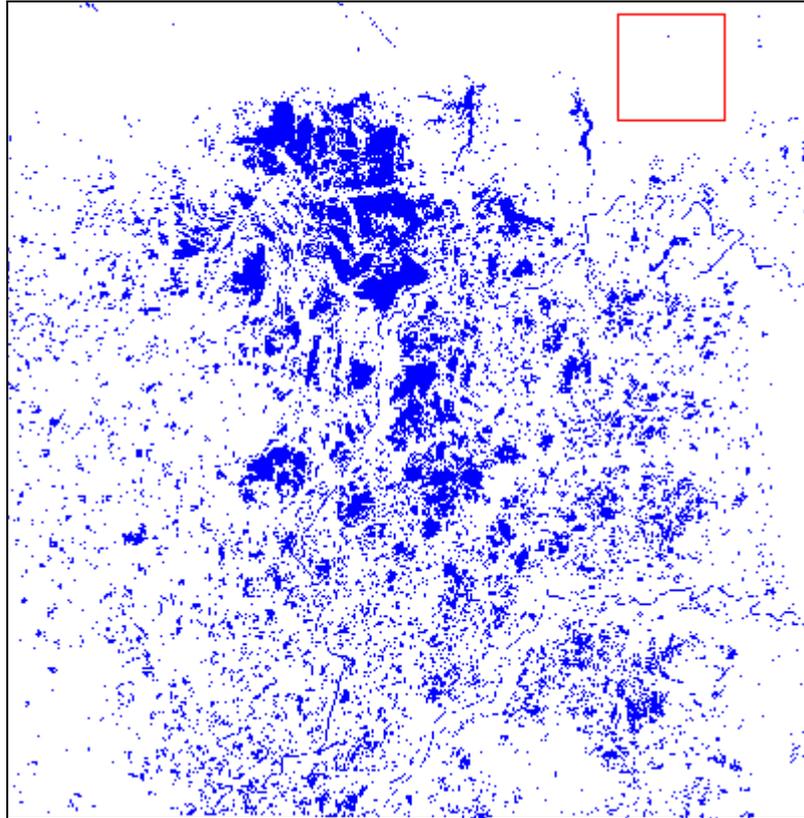


Figura 57 - Classificazione con il metodo Decision Tree della zona nel distretto di Sylhet, ottenuta dall'immagine CosmoSkymed. In blu è rappresentata la classe water, in bianco la classe no-water, nella quale sono state incluse anche le superfici con pendenza superiore al 2.5%

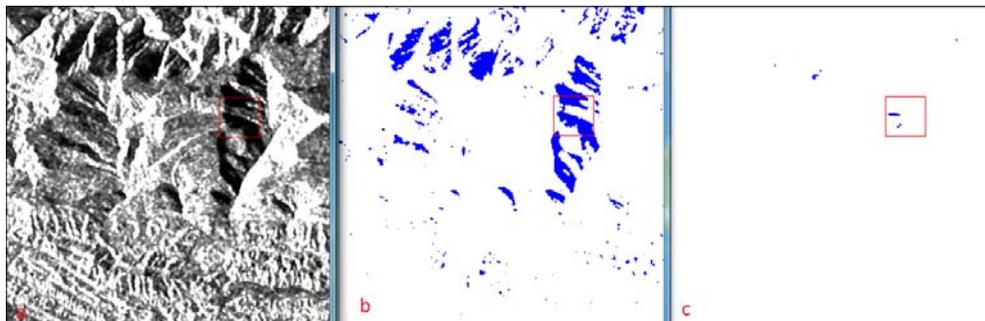


Figura 58 - Particolare nell'area di Sylhet preso rispettivamente: dall'immagine CosmoSkymed (a); dalla classificazione in cui vi è l'errore di assegnazione delle zone d'ombra alla classe water (b); dalla classificazione corretta (c).

4.6 Interpretazione in ambiente GIS di dati estratti dalla classificazione dell'immagine ASTER

La classificazione dell'immagine ASTER, trattata nel paragrafo 4.3.1.2 di questo stesso capitolo, ha evidenziato una vasta zona alluvionata. Volendo individuare la destinazione d'uso del territorio che maggiormente è stata colpita da questo particolare evento, si è proceduto all'esportazione della classe *water*, nella quale si delineano i confini dell'alluvione, in ambiente GIS e da qui si è proceduto con il confronto con dati di *landuse* forniti dal CEGIS (*Center for Environmental and Geographic Information Services*). In questi dati la superficie del Bangladesh è stata suddivisa in poligoni diversi a seconda del tipo di assegnazione del suolo. Da tale genere di dati si evince come le piantagioni di riso sono predominanti nel paese e principalmente se ne seminano tre diverse varietà: l'*aman* (e la sua variante trapiantata), il *boro* e l'*aush*; mentre in percentuali minori si coltivano cereali, ortaggi e frutta.

Dall'intersezione dei dati di *landuse* con quelli derivanti dalla classificazione si è notato come la zona rilevata dall'immagine ASTER si possa suddividere in sette diversi tipi di destinazioni d'uso del suolo, riportate di seguito (la parola *rotation* sta ad evidenziare la pratica del maggese che viene applicata, soprattutto, alle coltivazioni di riso):

- *urban* che delinea la città di Dhaka;
- *aush rotation*;
- *boro rotation*;
- *broadcast aman rotation*;
- *transplanted aman rotation*;
- *perennial crop* che riguarda le aree destinate alla coltivazione di cereali e ortaggi;
- *plantation crop* che delinea le zone in cui vi è presenza di frutteti.

Di ogni *uso del suolo*, quindi è stata studiata l'intersezione con la classe *water* della classificazione e sono state calcolate le aree che potenzialmente sono state interessate dall'inondazione. Da ciò è emerso come i territori più colpiti sono stati quelli destinati alla coltivazione del riso ed in particolare il *boro* con il 56,24% e

la varietà *aman* con il 37,63 % di superficie alluvionata, questo presumibilmente perché tali coltivazioni si trovano proprio a ridosso dei corsi d'acqua.

Nella tabella seguente, sono riportati i valori di superficie (in metri quadri) occupata dall'acqua, per ciascuna categoria di uso del suolo e le rispettive percentuali calcolate in base alla somma totale della superficie alluvionata. Da tali percentuali è stato ricavato poi il grafico rappresentato in Figura 59.

Tabella 6 - Superficie di ciascuna categoria d'uso del suolo interessata dall'alluvione e le rispettive percentuale.

	AUSH	BROADC. AMAN	PLANT. CROP	PEREN. CROP	URBA N	BORO	TRANSP. AMAN
SUPERFICI E (mq)	1436400	94678200	64800	11121300	988200	141525900	1819800
PERCENTU ALE	0,57%	37,63%	0,03%	4,42%	0,39%	56,24%	0,72%

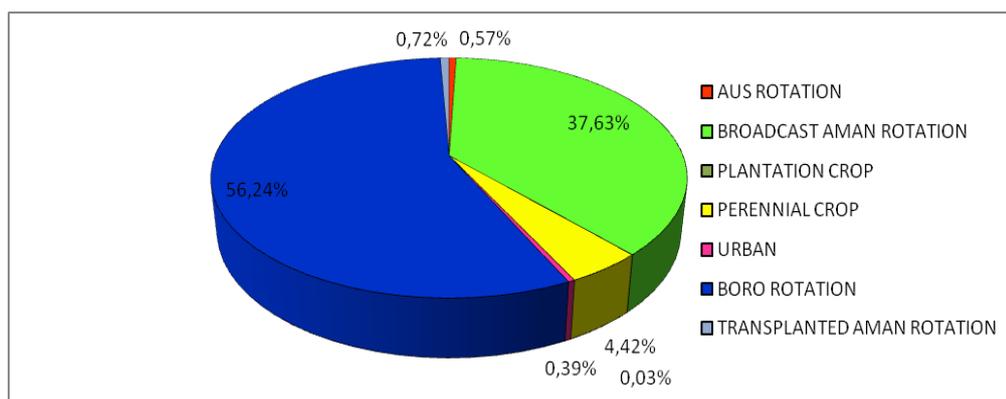


Figura 59 - Grafico a torta delle percentuali di superficie alluvionata che ha interessato le diverse categorie d'uso del suolo.

CONCLUSIONI

L'utilizzo dei dati satellitari per la gestione dei disastri naturali è fondamentale nei paesi in via di sviluppo, dove raramente esiste un censimento ed è difficile per i governi aggiornare le proprie banche dati con le tecniche di rilevamento ed i metodi di mappatura tradizionali che sono onerosi in termini economici e di tempo. A supporto dell'importanza dell'impiego del telerilevamento, e per favorirne l'uso nel caso di catastrofi, vi è l'operato di diverse organizzazioni internazionali promosse da enti di ricerca, da agenzie governative o da organismi sopranazionali, le quali svolgono un lavoro di cruciale valore, fornendo sostegno tecnico a chi si occupa di far giungere alle popolazioni colpite gli aiuti umanitari e i soccorsi nel più breve tempo possibile ed ottimizzando gli interventi in funzione del territorio e della distribuzione della popolazione.

L'attività di tesi è nata proprio dalla collaborazione con una di esse, ITHACA (*Information Technology for Humanitarian Assistance, Cooperation and Action*), organizzazione no-profit, fondata dal Politecnico di Torino e SiTI (Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali per l'Innovazione), la quale a sua volta collabora con il WFP (*World Food Programme*) delle Nazioni Unite, realizzando cartografie speditive necessarie per la valutazione delle conseguenze di un evento catastrofico attraverso l'impiego di dati acquisiti da satellite.

Su questo tema si è inserito il presente lavoro che ha avuto come obiettivo quello di dimostrare la valenza dei dati telerilevati, nel caso di uno dei disastri naturali più catastrofici, l'alluvione. In particolare è stata studiata la vulnerabilità a questa calamità del Bangladesh, il quale annualmente si trova ad affrontare eventi alluvionali spesso di grave intensità. A tal fine sono state analizzate tre diverse tipologie di immagini satellitari, due ottiche e una SAR (Synthetic Aperture Radar).

Dalla sperimentazione che ha accompagnato la tesi si è dedotto come le immagini ottiche multispettrali, e nel caso specifico le immagini Landsat 7 e ASTER usate in questo caso di studio, si prestino molto bene per l'analisi delle coperture e delle differenti caratteristiche del territorio, come è emerso dalla validazione condotta sulla classificazione dell'immagine Landsat 7 che ha portato

ad un'accuratezza del 93% circa. Nel caso di eventi alluvionali, tali peculiarità si possono impiegare per un'indagine a posteriori sulla devastazione dell'inondazione, per analizzarne ad esempio il perimetro ed ipotizzare i tempi di ripresa necessari alla zona colpita per ammortizzare i danni subiti. Inoltre, come si è visto durante la sperimentazione, è possibile incrociare le mappe tematiche ottenute con dati di *landuse*, in modo da poter individuare quale uso del suolo sia risultato più vulnerabile all'alluvione. Per di più, si potrebbe considerare la possibilità di un'analisi multi-temporale, per monitorare l'area in un arco di tempo più o meno ampio, al fine di supportare un'analisi del rischio della zona.

Le immagini ottiche, però, presentano un grosso limite nel caso delle alluvioni; infatti, la rilevante copertura nuvolosa che spesso accompagna siffatti eventi, impedisce ai sensori del satellite di rilevare il territorio e per questo esse non si prestano ad essere impiegate per un'indagine nell'immediato e cioè mentre la catastrofe è ancora in atto.

In questa circostanza, un valido aiuto può giungere dall'impiego di immagini SAR, le quali permettono osservazioni ad ogni ora del giorno e della notte, anche in presenza di nuvole, rendendole di fondamentale importanza in caso di alluvioni. Come è emerso dall'analisi condotta su immagini radar CosmoSkymed durante il lavoro di tesi, l'estrazione dei corpi d'acqua e più in generale dell'idrografia è risultata essere valida e di veloce computazione; ciò va ad avvalorare come questo tipo di immagini, in sé o in accoppiamento con altri dati di diversa origine, si presti a fornire in breve tempo informazioni sull'estensione del disastro, sul grado di devastazione, sulle vie di fuga più adatte, diventando risorsa importante per chi si occupa di stilare i diversi piani di evacuazione e di soccorso. Tuttavia sono emersi dei problemi per quanto riguarda la classificazione dell'acqua in presenza dei rilievi montuosi; tali complicazioni sono dovute alla presenza di zone d'ombra che risultano erroneamente attribuite alla classe *water*, ma è stato possibile correggere tali errori di attribuzione mascherando i rilievi con l'ausilio di una mappa delle pendenze ricavata da modelli di elevazione SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*).

Nell'ottica di ottenere nel più breve tempo possibile informazioni sull'entità di un dato evento catastrofico e nel particolare in caso di alluvioni, l'impiego di dati telerilevati si è dimostrato essere di sostanziale valore. Ciò nonostante, risultati

migliori si potrebbero trarre considerando le potenzialità di ogni singolo sensore, sia esso ottico o Radar, e le caratteristiche del territorio che esso è in grado di desumere. Si potrebbe, quindi pensare di analizzare l'area soggetta a catastrofi naturali impiegando dati rilevati con più di un sensore, andando ad incrociare, successivamente i prodotti ottenuti. Inoltre l'utilizzo di immagini con risoluzioni maggiori permetterebbe di ricavare mappe tematiche del territorio di maggior dettaglio.

L'integrazione di dati di tipo ottico e Radar è inoltre essenziale per pervenire ad una migliore caratterizzazione del fenomeno, sia in termini di *change detection* che di monitoraggio post-evento.

BIBLIOGRAFIA

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

Ali, A. *Vulnerability of Bangladesh to climate change and sea level rise through tropical cyclones and storm surges*. 171-179, 1996.

Bitelli G e Conte P. *Esperienze di mappatura di aree interessate da incendio mediante immagini multispettrali*. Atti 12a Conferenza Nazionale ASITA. L'Aquila: ISBN 978-88-903132-1-9, 2008. 459-460.

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

Bitelli G, Camassi R, Gusella L, e Mognol A. *Analisi ad oggetti di immagini telerilevate per lo studio del cambiamento in area urbana a seguito di eventi calamitosi*. Atti VIII Conferenza Nazionale ASITA. Roma, 2004. 449-454.

Bottini F. *Utilizzo di dati multirisoluzione da telerilevamento satellitare quale contributo preliminare*. Analisi dei Dati Satellitari per l'Osservazione della Terra e dei Pianeti . Pescara: International Research School of Planetary Sciences (IRSPS), 2001.

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

Carr, Lucas P., e Ellen M. Rathje. *The Use Of Remote Sensing To Identify Landslides Caused By The 2004 Niigata-Ken Chuetsu Earthquake In Japan*. Austin, Texas (USA), 2008.

Chiarato S. *Sensori remoti e di campo: confronti e tarature*. Venezia. 2004.

Dewan, AM., Makoto Nishigaki, e Mitsuru Komatsu. *DEM based Flood Extent Delineation in Dhaka City, Bangladesh*. Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology, 2004: 99-110.

Dewan, Ashraf M., Md. Mahabubul Alam, e Makoto Nishigaki. *Remote Sensing of 1998 and 2000 Floods in Greater Dhaka, Bangladesh: Experiences from Catastrophic and Normal events*. Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology, 2005: 57-65.

Dia, Aliou Mamadou. *Use of satellite image to map flood extent around the city of Sant Louis in the Senegal River estuary*. Dakar, 2005.

Harun S.M. Rafael. *Remote Sensing Techniques Used for Flood Mapping in Bangladesh. A Literature Review*. 2009

Hossain A. *Bangladesh: Flood Management*. WMO/GWP Associated Programme on Flood Management , 1-4, 2001

Jeyaseelan, A.T. *Droughts & Floods Assessment And monitoring Using Remote Sensing and Gis. Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*, 2004: 291-313.

Topouzelis K., Karathanassi V., Pavlakis P., Rokos D. *A New Object-Oriented Methodology To Detect Oil Spills Using Envisat Image*. Proceedings of the Envisat Symposium 2007. Montreux, Switzerland: European Space Agency, 2007.

Litchfield, W. A. (2010). Climate Change Induced Extreme Weather Events & Sea Level Rise in Bangladesh leading to Migration and Conflict. *ICE Case Studies*, num. 229 .

M.A.H. Pramanik, S.Murai, Y. Honda, A.S.Herath, H. kakiuchi e M. Takagi. *Flood Studies in Asia by Remote Sensing*. Water Resources. Tokyo: Institute of Industrial Science , 1992.

Martinis, S., A. Twele, e S. Voigt. *Unsupervised extraction of flood-induced backscatter changes in SAR data using Markov image modeling on irregular graphs*. IEEE- Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010.

Maya Nand Jha, Jason Levy and Yang Gao. *Advances in Remote Sensing for Oil Spill Disaster Management: State-of-the-Art Sensors Technology for Oil Spill Surveillance*. Sensors, 2008: 236-255.

Melis M.T. e Piloni M. *Analisi e validazione di una metodologia per la valutazione del land cover da dati MODIS inell'area mediterranea*. Rivista Italiana di Telerilevamento, 2011: 19-31.

Mohammad A. Mohit and Shakil Akther. *Delineation of Flood Damaged Zones of Dhaka City Based on the 1998 Flood by Using GIS*. Engineering Concerns of Flood. M. A. Ali, S. M. Seraj and S. Ahmad (eds): ISBN 984-823-002-5.303-318

Mycke-Dominko, algorzata. «*The Remote Sensing Method Of Forest Fire Danger Rating Categorization*.» Miscellanea Geographica, 2004: 359-362.

Nirupama, e Slobodan P. Simonovic. *Role of remote sensing in disaster management*. The University of Western Ontario: Institute for Catastrophic Loss Reduction, 2002.

P.Farina, S. Moretti, D. Colombo, A. Fumagalli, e P. Manunta. *Landslide Risk Analysis by means of Remote Sensing Techniques: Results from the ESA/SLAM Project*. 2008.

Petrarca M. *L'utilizzo delle immagini satellitari per il monitoraggio e la salvaguardia dell'ambiente*. In *Analisi dei Dati Satellitari per l'Osservazione della Terra e dei Pianeti*, 9-17. Pescara: International Research School of Planetary Sciences (IRSPS), 2001.

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

Salvador R, Diaz-Delgado R, Valeriano J and Pons X. *Remote sensing as a tool to map forest fires, to study the fire regime and their effects on plant communities and the integration into a GIS*. Remote Sensing for forest fires. Lisbona, 1998.

Roy, P.S. *Forest fire and degradation assessment using satellite remote sensing and geographic information system*. Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology. Dehra Dun: World Meteorological Organisation, 2003. 358-400.

Sandholt, Inge, Lotte Nyborg, Médou Lô Bjarne Fog, Ousmane Bocoum, e Kjeld Rasmussen. *Remote Sensing Techniques for Flood Monitoring in the Senegal River Valley*. Danish Journal of Geography, 2003: 71-81.

Stramondo, S., C. Bignami, M. Chini, N. Pierdicca, e A. Tertulliani. *Satellite radar and optical remote sensing for earthquake damage*. Roma, 2006.

Trianni, G. *Introduzione al Telerilevamento per l'osservazione della Terra*. Pavia: Università Degli Studi Di Pavia Facoltà Di Ingegneria Dipartimento Di Elettronica.2006.

Youcef Smara, Aichouche Belhadj-Aissa and Mostefa Belhadj-Aissa. *Application of GIS and Remote Sensing Technologies in Disaster*. Disaster Management and GIS Applications. Cairo, 16-21 April 2005.

Zhou, Yuyu, Yeqiao Wang, Arthur J. Gold, e Peter V. August. *Effects of Increasing Urban Impervious Surfacenon Hydrology of Coastal Rhode Island Watersheds*. In Remote Sensing of Coastal Environments, di Yequiao Wang, 355-367. Indiana, USA: Taylor & Francis Series in Remote Sensing Applications, 2010.

SITOGRAFIA

<http://www.ithaca.polito.it/>
<http://reliefweb.int/>
<http://un-spider.org>
<http://www.ittvis.com>
<http://www.disasterscharter.org>
<http://mceer.buffalo.edu>
<http://www.respond-int.org/Respond/>
<http://www.risk-eos.com>
<http://terra.nasa.gov>
<http://irsps.sci.unich.it/>
<http://unosat.web.cern.ch/unosat/>
<http://www.difa.unibas.it>
<http://www.eduspace.esa.int>
<http://gaia.agraria.unitus.it>
<http://www.oas.org>
http://www.meteomin.it/Satelliti/Ciclone_Yasi.asp
<http://cgz.e2bn.net>
<http://www.asi.it>
<http://landsat.org/about.html>
<http://www.scirp.org/>
<http://www.adpc.net/dms/GAC-B'desh%204.PDF>
<http://salekseraj.com/Page303-Mohit.pdf>
<http://www.aprsaf.org/d>
<http://asterweb.jpl.nasa.gov>
<http://www.creaf.uab.es>
<http://www.protezionecivile.it>
<http://www.irea.cnr.it>
<http://www.gim-international.com>
<http://www.banglapedia.org>
<http://srtm.csi.cgiar.org/>
<http://www.nytimes.com>

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare il Prof. Gabriele Bitelli per la costante disponibilità dimostrata nei miei confronti e per i preziosi consigli fornitomi nel corso di questi mesi.

Un sentito ringraziamento va al Prof. Piero Boccardo e all'Ing. Fabio Giulio Tonolo dell' Information Technology for Humanitarian Assistance, Cooperation and Action (ITHACA) di Torino, i quali con cortesia e disponibilità, sono stati sempre pronti a fornire gli eventuali chiarimenti in merito al lavoro di tesi.

Voglio ringraziare il dott. Ing. Emanuele Mandanici e il dott. Ing. Daniele Torlai per l'estrema pazienza dimostrata e per il supporto datomi durante l'uso del software ENVI.

Ringrazio il Dott. Andrea Lugli per l'accurata guida all'uso del software ArcGIS.

Un sincero grazie va a tutto il dipartimento del DICAM per la gentilezza con la quale mi ha accolto.

Le immagini ASTER sono state fornite a seguito di un grant NASA.