
UNIVERSITÀ DI PISA



Scuola di Dottorato in Ingegneria “Leonardo da Vinci”
Stefano Bennati (Direttore)

Programma di Dottorato in Scienze e Metodi per le Città ed
il Territorio Europei
Prof. Massimo Rovai (Presidente)

INTEGRAZIONE DI TECNICHE DI
OSSERVAZIONE DELLA TERRA E ANALISI
SPAZIALI PER LA VALUTAZIONE DEI
FENOMENI DI DISPERSIONE INSEDIATIVA

Tesi di dottorato

Relatori:

Prof. Ing. Beniamino MURGANTE

Prof. Ing. Rosa LASAPONARA

Correlatori:

Dott. Antonio LANORTE

Dottorando:

Gabriele NOLE'

Dicembre 2013

1 INTRODUZIONE.....	6
2 TECNOLOGIE E DATI PER L'ANALISI TERRITORIALE.....	8
3 LA DISPERSIONE INSEDIATIVA, L'INFORMAZIONE GEOSPAZIALE E LE TRASFORMAZIONI DEL TERRITORIO.....	10
3.1 IL TERRITORIO ESTERNO AL CENTRO ABITATO.....	13
3.1.1 LA DISPERSIONE DEL SISTEMA INSEDIATIVO.....	14
3.1.2 IL FENOMENO ALLA SCALA EUROPEA.....	15
3.1.3 I COSTI DELL'INSEDIAMENTO DISPERSO.....	17
3.1.4 L'EVOLUZIONE DEL TESSUTO INSEDIATIVO.....	19
3.2 FORME INSEDIATIVE DEL TERRITORIO.....	21
3.3 IL SUOLO E IL TERRITORIO.....	25
3.4 IL CONSUMO DI SUOLO.....	30
3.4.1 GLI APPROCCI LEGISLATIVI.....	38
3.4.2 COME MISURARE IL CONSUMO DI SUOLO.....	40
3.4.3 L'APPROCCIO PER LO STUDIO DELL'URBANIZZAZIONE E DEL CONSUMO DI SUOLO.....	41
4 GLI STRUMENTI DI LAVORO.....	43
4.1 UBUNTU.....	43
4.2 GRASS.....	44
4.2.1 LA STRUTTURA DEI DATI IN GRASS.....	45
4.2.2 TIPI DI DATI	46
4.2.3 LA REGIONE DI LAVORO.....	49
4.3 QGIS.....	50
4.4 R.....	51

4.5 OPEN SOURCE: GLI ASPETTI FONDAMENTALI.....	53
5 DALLE MISURAZIONI A DISTANZA ALLE INFORMAZIONI.....	55
5.1 IL GIS E IL REMOTE SENSING.....	55
5.2 METODI DI ANALISI SPAZIALE.....	56
5.2.1 ANALISI SPAZIALE.....	57
5.2.2 AUTOCORRELAZIONE SPAZIALE.....	60
5.3 GLI INDICATORI GLOBALI E LOCALI.....	63
5.4 IL REMOTE SENSING.....	64
5.5 I DATI TELERILEVATI.....	68
5.5.1 LANDSAT	69
5.5.2 ASTER.....	74
5.6 TECNICHE DI TRASFORMAZIONE DELLE IMMAGINI TELERILEVATE...78	
5.6.1 OPERAZIONI DI SOGLIA.....	79
5.6.2 OPERAZIONI ARITMETICHE.....	79
5.6.2.1 SOMMA DI IMMAGINI.....	80
5.6.2.2 DIFFERENZA DI IMMAGINI.....	81
5.6.2.3 MOLTIPLICAZIONE DI IMMAGINI.....	81
5.6.2.4 DIVISIONE DI IMMAGINI.....	82
5.7 TRASFORMAZIONI A BASE EMPIRICA.....	83
5.7.1 INDICI DI VEGETAZIONE	83
5.7.2 INDICI BASATI SULLA PENDENZA.....	85
5.7.2.1 NDVI	85
5.7.3 INDICI BASATI SULLA DISTANZA.....	88
5.7.3.1 PVI (PERPENDICULARVEGETATION INDEX).....	89

5.7.3.2 SAVI (SOIL ADJUSTED VEGETATION INDEX).....	90
5.7.4 INDICI A TRASFORMAZIONI ORTOGONALI (TASSELED CAP).....	90
5.7.5 ANALISI A COMPONENTI PRINCIPALI.....	91
5.7.5.1 MINIMUM NOISE FRACTION.....	94
5.7.6 TRASFORMAZIONI NELLO SPAZIO IHS.....	94
5.7.6.1 MIGLIORAMENTO DELLA RISOLUZIONE.....	95
5.7.7 TRASFORMAZIONI SULL'ISTOGRAMMA.....	95
5.7.7.1 ESPANSIONE (STRETCH) LINEARE.....	96
5.7.7.2 ESPANSIONE LINEARE CON TAGLIO DELLE CODE.....	97
5.7.7.3 EQUALIZZAZIONE.....	97
5.7.7.4 I DIAGRAMMI DI DISPERSIONE (SCATTER PLOT).....	97
5.7.8 FILTRI DIGITALI.....	98
5.7.8.1 FILTRI PASSA-BASSO (LOW PASS FILTER).....	101
5.7.8.2 FILTRI PASSA-ALTO (HIGH PASS FILTER).....	102
5.7.8.3 EDGE DETECTION.....	103
5.7.8.4 ALTRE TECNICHE DI FILTRATURA.....	105
5.7.8.5 OPERAZIONI MORFOLOGICHE.....	105
5.7.8.6 FILTRI DI TESSITURA.....	107
5.7.8.7 FILTRI ADATTATIVI.....	108
5.7.9 RAPPRESENTAZIONE DELLE IMMAGINI.....	108
5.7.9.1 VISUALIZZAZIONE IN PSEUDOCOLORI.....	109
5.7.9.2 RAPPRESENTAZIONE IN FALSI COLORI.....	109
5.8 FIRMA SPETTRALE E FIRMA SPAZIALE.....	111
5.9 LE TECNICHE.....	112

5.9.1 CLASSIFICAZIONE SUPERVISIONATA E NON SUPERVISIONATA	112
5.10 INDICI SPETTRALI.....	114
5.11 INFRAROSSO TERMICO.....	115
5.12 PARAMETRI ACCURATEZZA.....	117
5.13 L'USO INTEGRATO DEL GIS.....	119
5.14 LE CARATTERISTICHE DEI DATI	120
5.14.1 CAD E GIS.....	121
5.14.1.1 LA CARTOGRAFIA NUMERICA VETTORIALE.....	122
5.14.1.2 GIS VS CAD.....	123
5.14.1.3 IL PASSAGGIO DAL CAD AL GIS.....	125
5.14.2 DATI E CARTOGRAFICI E TELERILEVATI.....	127
5.14.3 DATA FUSION	129
5.14.4 INTEGRARE I DATI	131
6 IL CASO DI STUDIO.....	134
6.1 APPLICAZIONE 1: USO DEL DATO LANDSAT PER LO STUDIO DELLE AREE URBANIZZATE.....	134
6.1.1 LE IMMAGINI LANDSAT E L'URBANIZZATO.....	137
6.2 APPLICAZIONE 2 - CHANGE DETECTION	152
6.3 APPLICAZIONE 3 - STUDIO DEL SISTEMA INSEDIATIVO, VALUTAZIONE DELLA DENSITÀ URBANA E CHANGE DETECTION	159
6.3.1 IL VALORE DELLA CASA IN ITALIA.....	160
6.3.2 DATI	163
6.3.3 METODOLOGIA.....	165
6.3.3.1 CLASSIFICAZIONE E CHANGE DETECTION.....	165
6.3.4 LA STIMA DELLA PRESSIONE INSEDIATIVA.....	171

6.4 APPLICAZIONE 4 - CLASSIFICAZIONE SUPERVISIONATA DELL'URBAN SPRAWL	175
6.4.1 I CLASSIFICATORI.....	177
6.4.2 METODOLOGIA.....	181
6.4.2.1 CLASSI E BANDE SPETTRALI.....	182
6.4.2.2 ASTER.....	182
6.4.2.3 LANDSAT.....	190
7 CONCLUSIONI	200
8 BIBLIOGRAFIA	204

1 INTRODUZIONE

La dispersione insediativa (o sprawl urbano) è un processo multifattoriale che comporta un'alterazione del territorio. E' un fenomeno che viene associato ad una crescita disordinata di edifici e infrastrutture che impoverisce la bellezza e l'autenticità del paesaggio. La dispersione insediativa spesso prolifera su aree non pianificate ed è generatrice di diseconomie di diverso tipo. E' accompagnata da problemi paesaggistici e da aspetti negativi sotto il profilo ecologico, estetico ed economico. In estrema sintesi, “la dispersione è correlata alla casualità di nuove localizzazioni, alla perdita di una chiara forma urbana; un modello di urbanizzazione caratterizzato dall'assenza di strumenti di pianificazione strategica e, quindi, con debole capacità di pianificazione e gestione alla scala vasta dei processi di trasformazione insediativa”¹.

Tra le diseconomie sottoposte ultimamente ad attenzione della pubblica opinione c'è il consumo di suolo, dovuto all'impermeabilizzazione e cementificazione del territorio. I dati sul consumo di suolo degli ultimi anni sono rilevanti e destano preoccupazione sia in ambito nazionale che europeo.

Il sistema insediativo, lo sprawl urbano, lo studio e il monitoraggio del territorio con nuove e moderne tecnologie rappresentano il focus di questo lavoro di tesi e in questa ricerca si intende testare nuovi metodi e tecniche utili per la valutazione dell'espansione urbana.

Lo studio si basa sull'uso dei dati territoriali tradizionali (aereofotogrammetrie, ortofoto, etc.) e dei dati telerilevati (i dati da satellite principalmente usati sono dati Landsat e Aster - <http://landsat.gsfc.nasa.gov/> <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>).

Nel lavoro sono state applicate tecniche di autocorrelazione spaziale per la caratterizzazione del pixel urbano, sono state applicate analisi spaziali e change detection per il monitoraggio e la comprensione dell'evoluzione del sistema insediativo.

¹ I Costi collettivi della Città dispersa di Roberto Camagni, Maria Cristina Gibelli, Paolo Rigamonti.

Tutto il lavoro si è basato sulla integrazione tra i Sistemi Informativi Territoriali (SIT o GIS) e il Telerilevamento (o Remote Sensing) con tecnologie free/open source e dataset free. L'area di studio riguarda diversi contesti territoriali nella Regione Puglia. La scelta della zona di studio è stata dettata dal fatto che nel territorio pugliese il fenomeno della diffusione insediativa è molto dinamico negli ultimi anni e anche perché la Regione Puglia ha reso fruibili diversi dati territoriali fruibili via web. In questo lavoro gli strumenti utilizzati sono tutti open source e le analisi spaziali effettuate hanno continuamente riguardato l'uso contemporaneo di dati geografici “classici” e di dati telerilevati.

I principali obiettivi sono i seguenti:

- analizzare le tecniche di indagine e le metodologie disponibili nell'ambito del rilievo da piattaforme satellitari integrandole a tecniche di autocorrelazione spaziale
- sperimentare metodi e tecniche consolidate per l'estrazione di informazioni da dati telerilevati con consecutiva integrazione in ambiente GIS.

La tesi si compone di due parti, la prima teorica introduttiva e la seconda, applicativa, in cui vengono trattati i casi di studio .

A tal fine sono stati dapprima analizzati i fondamenti teorici delle discipline che si occupano del fenomeno, tentando un riordino ed analizzando le relazioni che legano le stesse sia dal punto di vista teorico che applicativo. Sono state esposte le caratteristiche dei dati disponibili dal telerilevamento spaziale e le varie possibilità di elaborazione.

E' stato analizzato lo stato dell'arte sull'integrazione tra GIS e Remote Sensing, in relazione alla diversità di concetto spaziale ed informativo, alla tipologia dei dati, ai problemi relativi alle scale di analisi, agli approcci analitici della matrice territoriale ed ai risultati possibili.

La seconda parte riguarda le fasi sperimentali in relazione ai caso di studio. Sono state sperimentate diverse tecniche di classificazione supervisionata al fine di individuare un

percorso metodologico operativo che risolve, almeno in parte, l'integrazione del grande patrimonio informativo derivato dal Remote Sensing in ambiente GIS.

2 TECNOLOGIE E DATI PER L'ANALISI TERRITORIALE

La pianificazione territoriale che, assieme alle discipline della geografia e delle scienze regionali, si confronta con il problema di costruire e gestire l'informazione geografica connessa ai processi di trasformazione del territorio, oggi si confronta con una comunità di utenti che applicano un nuovo approccio di apertura dei dati. Si trova così ad affrontare nuovi scenari che dipendono fortemente dalle modalità di accesso ai dati e dalle opportunità di internet emergono nuove occasioni per acquisire conoscenza utile per un miglior governo del territorio. Negli ultimi decenni la maggiore disponibilità di informazioni geografiche e nuove metodologie hanno portato un notevole progresso nel campo delle analisi spaziali. La possibilità di usufruire sempre più facilmente dell'informazione territoriale (basti pensare a strumenti come Yahoo Maps, Google Maps, Google Earth, OpenStreetMaps) facilita l'approccio finalizzato alla risoluzione dei problemi di gestione del territorio. E' importante sottolineare che, per poter analizzare efficacemente i dati territoriali, l'elemento di primaria importanza (ossia il dato geografico) deve rispondere a rigorose specifiche tecniche ed informative per poter essere correttamente utilizzato.

D'altro canto, le nuove tecnologie e l'integrazione di diverse mappe tematiche, offrono la possibilità di monitorare l'evoluzione del territorio ad alta risoluzione spaziale e temporale.

Le tecniche e le tecnologie utili per poter affrontare lo studio di fenomeni territoriali sono sempre più efficienti e rappresentano un valido supporto per il pianificatore.

L'accesso ai dati territoriali "tradizionali" e, seppur in maniera meno diretta, anche ai dati satellitari, negli ultimi anni risulta facilitato anche grazie all'avvento del web.

Solo un decennio fa l'accesso ai dati spaziali era molto più difficoltoso.

Questo lavoro di tesi si basa sullo studio del territorio mediante dati geografici “classici” e dati satellitari multispettrali e multitemporali che hanno una licenza d'uso appropriata.

I progressi nel trattamento dei dati spaziali e nella qualità degli stessi, uniti ad un processo di liberalizzazione² dell'informazione geografica (OpenGeoData) che si sta sviluppando, ha portato benefici nelle scienze che si occupano di territorio.

In questo contesto di crescita tecnologica, lo sviluppo delle due tecnologie, GIS e Remote Sensing, è avvenuto in maniera quasi del tutto indipendente e l'unione dei due ambienti risulta ancora problematico. Le due discipline, pur trattando lo stesso oggetto (il territorio), hanno avuto negli anni diversi approcci e sviluppi indipendenti, con diversi sistemi di rappresentazione territoriale.

I sistemi informativi territoriali rappresentano ormai un settore in cui sono state investite molte risorse economiche per le analisi di dati geografici con uno sviluppo molto dinamico dei software specifici. I settori che sono interessati alle tecnologie GIS sono sempre di più e in questo caso l'attenzione è rivolta ai fenomeni ambientali o del governo del territorio, rivestendo un ruolo fondamentale nei processi di valutazione e decisione.

Così come il GIS, anche il Remote Sensing, che riguarda l'insieme di tecniche, strumenti e metodologie per il rilievo ed il trattamento dei dati rilevati da piattaforme aeree e satellitari, ha avuto una notevole diffusione negli ultimi anni. Le informazioni estraibili dal Remote Sensing costituiscono un grande patrimonio informativo, sia quantitativo che qualitativo. L'utilizzo dei dati telerilevati per utenti non esperti non è immediato ma è disponibile mediante l'uso di strumenti informatici diffusi, il cui utilizzo si va sempre più a consolidare nel tempo.

A differenza del GIS che ha visto una notevole diffusione di software per la gestione dei dati territoriali, il trattamento dei dati telerilevati è legato a strumenti specificatamente dedicati. Tuttavia oggi le diverse tipologie di software cominciano a “comunicare” tra loro cercando di integrare sempre più il trattamento dei dati cartografici GIS e dei dati telerilevati.

² Dati geografici liberi disponibili con diverse licenze d'uso non restrittive

Le potenzialità derivanti dall'integrazione dei due campi, hanno spinto ricercatori, studiosi e software house a trovare una linea comune di utilizzo delle due discipline. Per comprendere le difficoltà, tutt'oggi non completamente risolte, è necessario porre in risalto le differenze tra i formati di dati, l'incompatibilità di scala di acquisizione, gli errori di accuratezza.

Oltre a ciò il problema della integrazione è ancor più complicato se l'ambito territoriale di studio è quello urbano, che condiziona fortemente la scelta degli strumenti da utilizzare, nei dati e negli approcci di analisi degli stessi per l'estrazione delle informazioni. Infatti i territori antropizzati sono caratterizzati da un intenso e multifunzionale uso degli spazi con frequenti cambiamenti di copertura del suolo.

I software per il trattamento dei dati territoriali stanno subendo notevoli modifiche in tal senso cercando di unificare il trattamento di dati di origine diversa. Un esempio di integrazioni di software, in ambito commerciale, è dato dall'integrazione oggi possibile tra software come ENVI (per il Telerilevamento) e Esri Arcgis (per i Sistemi Informativi Geografici). In questo caso l'interoperabilità è sicuramente migliorata, ma si tratta sempre di due ambienti software diversi. In ambito open source invece esiste la possibilità di lavorare in un unico ambiente GIS nel quale sono integrati moltissimi tool di telerilevamento. Questo è il caso del software open-source GRASS GIS (<http://grass.fbk.eu/>). Inoltre GRASS si interfaccia molto bene con software desktop GIS come Quantum GIS (<http://www.qgis.org/>) e software statistici come R (<http://www.r-project.org/>) per poter svolgere analisi geostatistiche.

3 LA DISPERSIONE INSEDIATIVA, L'INFORMAZIONE GEOSPAZIALE E LE TRASFORMAZIONI DEL TERRITORIO

Le scelte effettuate dall'uomo, i cambiamenti climatici che riguardano l'aumento, in intensità e frequenza, dei fenomeni estremi (uragani, temporali, inondazioni, siccità,

ondate di calore, ecc ...), l'aumento di temperatura, la perdita di biodiversità, sono in grado di influenzare le dinamiche territoriali ed innescare processi di impoverimento delle risorse naturali. Il consumo di suolo, ovvero la progressiva perdita di ampie aree della superficie del globo sottratte alle attività “naturali”, rappresenta uno dei più pressanti problemi di questi ultimi decenni ed è un fenomeno che riguarda gran parte dei Paesi Europei, tra i quali l'Italia. Il consumo di suolo è legato alla cementificazione del territorio e, allo stesso tempo, seppur in maniera meno evidente, ad un altro fenomeno molto diffuso come la desertificazione del territorio. La percentuale di territorio italiano a rischio desertificazione è stabile da un paio di anni al 30%. Le regioni maggiormente a rischio sono la Puglia, Basilicata, Calabria, Sicilia, Sardegna: esse mostrano il processo di desertificazione in stato avanzato. Anche le regioni del centro nord, in particolare Toscana ed Emilia Romagna, manifestano un peggioramento della situazione idrometeorologica e sono sempre più vulnerabili all'irregolarità delle precipitazioni.

Per quanto riguarda invece il consumo di suolo dovuto alla cementificazione del suolo, l'identificazione delle cause è sicuramente più diretta.

Consumo di suolo ed eccessiva cementificazione sono strettamente legati al fenomeno della dispersione insediativa. Lo sprawl urbano, come accennato, è inteso come la diffusione di edificato non organizzata nel territorio, può essere analizzato e studiato integrando le tecnologie GIS e Remote Sensing. Data la dimensione del problema, è chiaro che il perfezionamento delle attuali strategie di valutazione, monitoraggio ed analisi, costituisce una delle più importanti sfide per il futuro della gestione del territorio.

Le dinamiche spaziali e temporali dei paesaggi possono essere oggi analizzate in maniera più esauriente integrando osservazioni satellitari con quelle terrestri. I sistemi di telerilevamento operano su una varietà di livelli spaziali (dal locale al globale) e, a seconda delle caratteristiche della loro orbita, sono in grado di fornire molteplici viste sinottiche di un'area e tracciarne la variabilità temporale in una firma spettrale. Da più di due decenni una serie di satelliti geostazionari e polari operano nel campo della ricezione ed emissione delle informazioni. Essi hanno prodotto grandi database che possono essere utilizzati per attività valutative e monitorative a livello regionale e globale. Oggi, il

telerilevamento satellitare è diventato uno degli strumenti più importanti nella raccolta di informazioni spaziali sullo stato dell'ambiente. Questo processo avviene in primo luogo, rimuovendo dal segnale le influenze esterne che hanno avuto luogo nel processo di acquisizione (ad esempio, estinzione atmosferica) e, in seconda battuta, assegnando un sistema di riferimento geografico alle immagini; per il raggiungimento di questo obiettivo sono disponibili efficienti metodi applicabili di routine. In secondo luogo, il segnale registrato deve essere tradotto in informazioni utili mediante la conversione delle misurazioni fisiche della superficie riflettente in indicatori qualitativi della copertura del suolo.

L'applicazione di questi metodi ha permesso il raggiungimento di notevoli progressi: gli utenti hanno accesso ad una vasta gamma di modelli e algoritmi efficienti utili alla progettazione di soluzioni di telerilevamento da applicare nel mondo reale. Grazie all'attività continua dei sistemi satellitari nel corso degli ultimi anni, è possibile monitorare le modifiche avvenute nel tempo e nello spazio nel lungo periodo.

Al fine di poter studiare i fenomeni suddetti risulta di fondamentale importanza la possibilità di usufruire di informazioni precise ed imparziali sull'estensione delle zone colpite. Questo è basilare non solo per la comprensione dei meccanismi del fenomeno, ma anche per l'implementazione di efficaci strategie di prevenzione e mitigazione. Come già detto, l'evoluzione del territorio è spesso un prodotto derivato delle azioni dell'uomo e qualsiasi variazione e degrado ambientale si rispecchia sul paesaggio. Tutto questo può essere individuato e quantificato utilizzando i dati spaziali. Il ricorso integrato a sistemi di telerilevamento satellitari, di osservazioni dal suolo e di database geografici risulta in grado di fornire informazioni coerenti, riproducibili ed economicamente efficaci sulla copertura del suolo. Attraverso queste tecnologie può essere assicurato un ulteriore elemento che è quello della continuità delle osservazioni (monitoraggio a lungo termine) necessaria per rappresentare l'elevata variabilità del territorio e per distinguere l'impatto delle azioni umane da quello della variabilità del clima.

3.1 IL TERRITORIO ESTERNO AL CENTRO ABITATO

Guardando alle trasformazioni che il paesaggio al di fuori della città viene a subire, si nota l'interruzione del continuo degli spazi naturali e agricoli dovuta all' "immissione" di infrastrutture e di manufatti residenziali e commerciali. Una nuova identificazione dello spazio rurale che continua ad essere il luogo in cui si esplicano le attività agricole, ma che si presenta oggi con l'innesto sparso di nuove attività economiche e abitative, come uno spazio multifunzionale. Al suo interno sono presenti aree che si allontanano dalla ruralità e si avvicinano ai caratteri urbani: questo è un processo inevitabilmente irreversibile. Sembra che la campagna arretri inesorabilmente di fronte all'espansione inarrestabile della città. Si tratta di aree né "vuote" né "piene" che non rappresentano, appunto, né la città né la campagna. Si tratta, solitamente, di aree con una discreta dotazione di infrastrutture che rappresentano il primo risultato del decentramento metropolitano. In questa parte di territorio sono presenti nuove gerarchie e funzioni che non necessariamente premiano le aree in diretta relazione con il centro. Le attività agricole risentono dei processi di urbanizzazione in atto e della crescente densità di popolazione insediata. Almeno teoricamente questo territorio è costituito da aree destinate o ancora destinabili alle attività agro-silvo-pastorali dislocate in stretta connessione con le aree urbane più strutturate e, comunque, da queste facilmente accessibili. Il mantenimento delle attività agricole è spesso pesantemente condizionato dalle aspettative verso una diversa destinazione urbanistica ed alla conseguente lievitazione del valore dei terreni. Conseguentemente l'identificazione in queste aree non corrisponde in alcun modo alla prefigurazione di un destino futuro delle stesse, ma rappresenta esclusivamente la presa d'atto di caratteristiche evidenti del territorio. In sede di pianificazione urbanistica comunale, pertanto, il passaggio di queste aree a territorio urbano, se previsto, dovrà essere di volta in volta giustificato da reali necessità d'espansione dell'urbanizzato non risolvibili attraverso la riqualificazione ed il riordino dei tessuti urbani esistenti. In tal senso è opportuno citare l'esempio del nuovo piano regolatore del comune di Firenze che, come aree adatte alla nuova espansione cittadina, non indica le aree esterne al tessuto urbano, ma individua (con costi molto elevati) le aree industriali dismesse ormai inglobate nel perimetro urbano.

La caratterizzazione e la tipologia dell'insediamento diffuso ha subito forti variazioni nei decenni in Italia. Nei primi secoli dopo il 1000, il sistema insediativo diffuso era incentrato su villaggi, in genere prossimi a castelli, di dimensioni medio-piccole, mentre oggi sono spesso il frutto di nuove scelte di abitazioni residenziali. Sono situazioni ancora oggi visibili, ma si tratta di residui di una condizione che nel Medioevo era assai più diffusa. Seguire l'evoluzione delle varie forme di insediamento diffuso nel corso del tempo è sicuramente una operazione laboriosa, ma è interessante tenere in conto delle diverse forme di insediamento che si sono delineate nel tempo sul territorio secondo diversa genesi.

Tutto questo indica che i centri abitati dispersi spesso sono una stratificazione nel tempo di diverse situazioni che però presentano entità preoccupanti negli ultimi decenni. In linea generale il sistema disperso è figlio di una non-pianificazione ma, in rari casi, è il risultato di particolari politiche insediative perseguite in aree già ad habitat accentrato.

In ogni caso è opportuno che il Piano, a livello comunale e sovracomunale, ponga oggi la dovuta attenzione allo studio della casa sparsa, individuandone la genesi e ponendo un freno a sparpagliamenti urbani ingiustificati.

3.1.1 LA DISPERSIONE DEL SISTEMA INSEDIATIVO

Le ragioni che inducono alla riproduzione di tale fenomeno (oltre alla ricerca di diverse preferenze residenziali e nuovi stili di vita) sono probabilmente la risposta ai problemi crescenti della città. Difficoltà di raggiungere luoghi posti al centro con l'automobile, costi degli alloggi nel centro della città sempre più gravosi, mancanza di parcheggi, congestione, inquinamento acustico e atmosferico, sicuramente inducono alla ricerca di una alternativa localizzativa. Nei piccoli comuni invece, in particolar modo nel Sud Italia, esiste spesso la strana tendenza a svalorizzare il borgo antico abbandonando progressivamente gli edifici storici edificando nel territorio aperto.

Un altro aspetto fondamentale che può indurre a spostarsi in campagna è la ricerca di una migliore qualità urbana ed ambientale individuale, indifferente a quella collettiva e al valore delle stratificazioni storiche caratteristiche della città. Probabilmente anche gli operatori immobiliari trovano convenienza nel costruire nuovi insediamenti residenziali

in aree esterne che offrono più opportunità e spesso minori vincoli urbanistici e istituzionali. Queste motivazioni sembrano investire gran parte del territorio italiano ed europeo.

3.1.2 IL FENOMENO ALLA SCALA EUROPEA

In tutta Europa lo spostamento dei cittadini dal centro verso le aree esterne alle città è un fenomeno sempre più palese. Un esempio evidente è la realtà francese, dove si è passati dai 60 abitanti per ettaro del 1954 ai 30 abitanti per ettaro del 1990 (Dubois-Taine e Chalas, 1997) e dove la migrazione verso le corone esterne supera nettamente quella diretta verso il centro (Fig. 1). Il paesaggio transalpino è ormai contraddistinto da grandi infrastrutture, grandi centri commerciali all'ingresso delle città (denominati 'entrées de ville'), grandi strade-mercato, edilizia residenziale spontanea e disseminata.

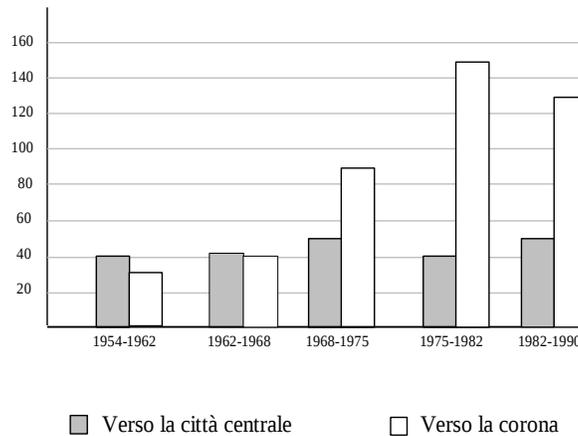


Fig. 1 Francia: migrazioni verso la città centrale e verso la corona (in migliaia).
Fonte Certu 2000

Molti governi europei hanno assunto un deciso impegno in ambito di sostenibilità urbana. Un impegno atto alla promozione di politiche, piani e progetti mirati al governo dei processi di urbanizzazione di frangia metropolitana. Tutto ciò nasce dalla consapevolezza che la dispersione urbana è responsabile di alti costi per la collettività. Già nel 1994, il documento della Commissione Europea "Europa 2000+", propone "misure volte a

combattere l'urbanizzazione delle aree rurali" e "a preservare gli spazi liberi vicini alle aree urbane"; e, ancora più esplicitamente nell'ambito dei lavori per lo Schema di Sviluppo dello Spazio Europeo, si scrive: "Città e villaggi continuano a svilupparsi in maniera spesso anarchica. La dispersione insediativa aumenta i costi di infrastrutturazione, aumenta il traffico urbano e il consumo di energia, degrada la qualità del paesaggio rurale e dell'ambiente. Va in direzione completamente contraria ai dettati del modello di città sostenibile"(Esdp, 1997, p.19). Uno degli elementi responsabili della diffusione è da ricercare nella inefficacia della Pianificazione di area vasta; a tal proposito "la sua assenza e/o la sua debolezza, nella deregolamentazione urbanistica, è una delle cause della dispersione insediativa" (Salzano 2004). Appare ovvio, per contrastare e controllare tale fenomeno, la necessità di ripresa della suddetta Pianificazione e dell'integrazione tra la pianificazione dei trasporti e degli usi del suolo.

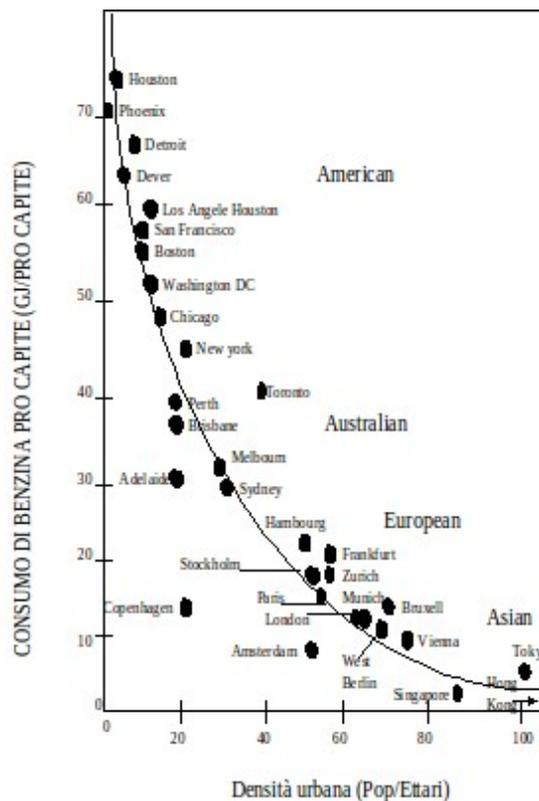


Fig. 2 Consumo di benzina in relazione alla densità demografica. Fonte: Newman e Kenworthy, 1989

3.1.3 I COSTI DELL'INSEDIAMENTO DISPERSO

Quindi decisioni di livello locale sull'uso del suolo necessitano di una efficiente politica di area vasta. A tale livello di pianificazione deve essere associato un coordinamento sovracomunale, una visione di lungo periodo, e comunque una regolamentazione. “E' giusto seguire la via della concertazione, ma appare evidente la necessità di un approccio Top-down che dia efficacia e stabilità all'azione pubblica in materia di salvaguardia ambientale e salvaguardia sociale. Leggi urbanistiche regionali che sembrano procedere in tal senso sono quelle della Toscana, della Liguria, del Lazio, della Basilicata e dell'Emilia Romagna” (Salzano 2004).

Una “urbanizzazione” senza regole della campagna, consuma il suolo, snatura il paesaggio. La città diffusa, inoltre, non ha un centro, né una piazza; spazi grandi senza una funzione sociale. Spesso strutturata in linea retta, fra un centro abitato e l'altro, con le villette e gli stabilimenti che sorgono lungo un'arteria di collegamento ad alta percorrenza. Le “vicinanze” nella città diffusa sono troppo lontane rispetto a quelle della città compatta. Tutta la città diffusa è una città privata, con servizi scarsissimi, a meno che non si considerino tali i grandi centri commerciali. Tuttavia altre diseconomie sono connesse: il tempo necessario per gli spostamenti raggiunge limiti intollerabili, sia per le persone che per le merci; i prezzi, che un tempo erano convenienti e attraevano tante persone dalla “città densa”, ora crescono vertiginosamente; si fanno sentire i costi di urbanizzazione (essendo le villette e gli stabilimenti costruiti senza alcuna pianificazione); è difficile sostenere investimenti nel settore dei trasporti pubblici, della costruzione e manutenzione delle infrastrutture viarie e dei servizi pubblici (illuminazione pubblica, raccolta rifiuti, ecc..) per aree così diradate che dipendono quasi esclusivamente dall'auto privata. Altri fattori che penalizzano la diffusione insediativa sono l'inquinamento estetico acustico ed atmosferico, l'impatto ambientale, il consumo di suolo (che riduce la permeabilità del terreno e produce dissesto), l'aumento della percorrenza casa-lavoro, la crescita della mobilità extra comunale e la maggiore congestione stradale. Proprio la mobilità su gomma, oltre all'inquinamento, produce una

estensione delle ore di punta, una maggiore numerosità degli incidenti stradali, un maggior consumo pro-capite di benzina. Dati sul consumo pro-capite di benzina sono rilevabili dallo studio di due ricercatori australiani (Newman e Kenworthy) che hanno constatato l'effetto della densità su 32 città del mondo. E' semplice notare che al diminuire della densità aumenta il consumo pro-capite di carburante. Altri dati significativi, sempre relazionati alla densità, sono quelle relativi alla distanza annua percorsa per famiglia e al numero di automobili possedute per famiglia.

Uno studio francese, esaminando tutte le città divise in classi di densità, ha rilevato la distanza media annuale percorsa per famiglia e la disponibilità di automobili per famiglia: entrambi i valori decrescono all'aumentare della densità.

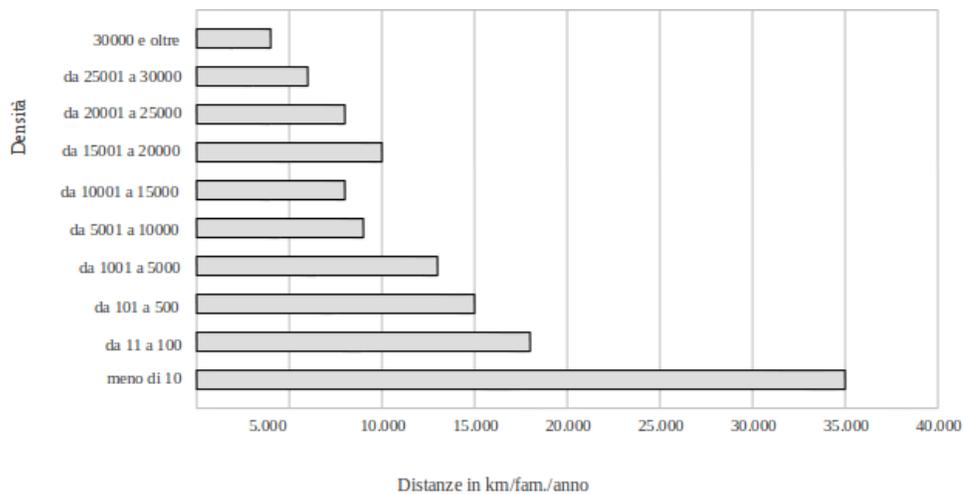


Fig. 3 Distanza annua per famiglia in base alla densità (ab/Kmq) dei comuni in Francia nel 1993. Fonte: Fouchier 1998

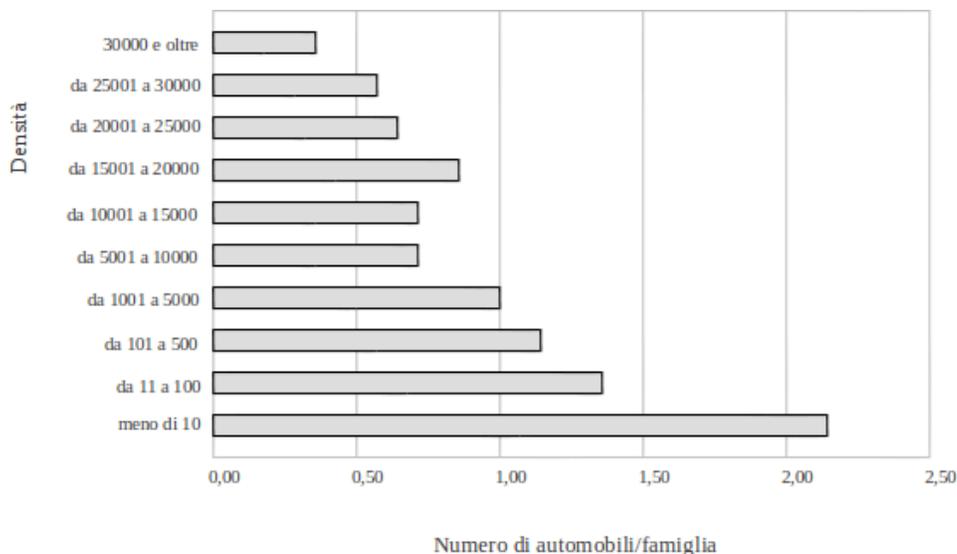


Fig. 4 Numero di automobili/famiglia in base alla densità (ab./Kmq) dei comuni in Francia nel 1993. Fonte: Fouchier, 1998

I costi della dispersione sembrano quindi crescenti, sia nel campo pubblico, che in quello privato. Inizia però ad emergere una nuova attenzione verso i costi privati della città diffusa (ad esempio ciò che lo Stato scarica sostanzialmente sul singolo cittadino che si trova a provvedere di persona alle proprie esigenze di mobilità; o che in assenza di una offerta pubblica di abitazioni a buon mercato in città si trova costretto a rivolgersi alla città diffusa per trovare abitazioni appetibili dal punto di vista del rapporto prezzo-qualità.. Ma quelli che destano maggior preoccupazione sono soprattutto i “nuovi” costi pubblici, quelli relativi alla sfera ambientale.

Tutto ciò è lontano da uno sviluppo sostenibile ampiamente sbandierato negli ultimi anni.

3.1.4 L'EVOLUZIONE DEL TESSUTO INSEDIATIVO

Se questa nuova strutturazione dello spazio tende a diventare una modalità ricorrente di organizzazione dello spazio, potremmo avere nei prossimi anni uno scenario completamente diverso della città. Un problema legato ad una posizione culturale, alle caratteristiche proprie della città: compattezza, mix funzionale, vicinanza, riconoscibilità,

confine, sono infatti elementi sempre meno chiari. Ma potrebbe sorgere una domanda: questa configurazione territoriale, che è chiamata città dispersa, potrebbe essere un fenomeno transitorio/temporaneo proiettato verso una configurazione compatta della città?

Effettivamente, la città si può sviluppare prendendo forme da vari schemi più o meno organizzati. La diffusione potrebbe essere una tipicità evolutiva e non un nuovo modello di organizzazione spaziale. Una città può nascere da un nucleo insediativo originario, conservando nel tempo la sua densità spaziale. Può essere il risultato del congiungimento di edilizia sparsa, di due o più nuclei diversi, che da una iniziale densità senza relazione, si connettono fisicamente e potrebbe anche essere la composizione di vari insediamenti negli spazi aperti che pian piano vanno ad integrarsi passando da una dispersione ad una compattazione. Di sicuro, la città compatta segue il piano ed è pianificata, la città diffusa non segue nessuna regola ed è molto improbabile, quindi, che il ceppo originario della dispersione si tramuti col tempo fino ad assumere i veri caratteri della città. Guardando alla dispersione urbana come uno stadio di un percorso evolutivo, i costi collettivi della città dispersa dovrebbero essere interpretati come costi transitori. Quindi i costi collettivi, aggiuntivi a quelli della città compatta, in una fase di passaggio, andrebbero ad annullarsi con l'azzeramento del grado di dispersione spaziale. La rilevanza delle diseconomie della dispersione è data, in questo caso, dal loro ammontare per unità di tempo e dalla durata della transizione. Misurarle vuol dire pensare ad una transizione come un processo che avviene in un tempo non esiguo. In questo modo, la durata della transizione diventa un aspetto determinante; la durata del passaggio da una configurazione di disequilibrio economico, ad una configurazione stabile di equilibrio. E' allora importante capire; per quanto tempo queste aree, prima di essere assorbite dalla città, costituiranno un aggravio sui costi della collettività?

Ma la città dispersa, oltre che una configurazione transitoria, può essere anche considerata una configurazione stabile. Quindi una strutturazione del territorio diffusa che tende a permanere nel tempo. E' allora probabile che l'evoluzione sia una non-città, che conservi questa dispersione, senza mai acquisire la caratteristica di una città compatta.

Una non-città che persegue gli ottimi individuali, di chi fa una scelta di delocalizzazione, e pregiudica quelli collettivi. Una formazione che relaziona le preferenze dei singoli con le forme dello sviluppo spaziale. Una strutturazione territoriale a bassa densità che comporta disequilibri economici.

Di sicuro, sono costi che sarebbero molto più attenuati nel caso di diversa tipologia di espansione insediativa, come ad esempio quella per contiguità. Misurare e valutare i costi collettivi della dispersione significa trasformare il processo di evoluzione della configurazione fisica del territorio in un oggetto di analisi e, in linea di principio, in un campo di intervento pubblico.

3.2 FORME INSEDIATIVE DEL TERRITORIO

Alla base della Pianificazione del territorio deve esserci la conoscenza dello stesso, individuando, nel caso specifico, le diverse forme di urbanizzazione che possono avere caratteristiche molto diverse tra loro. Nel corso degli anni in Italia sono stati promossi diversi studi in tal senso ed è importante citare come esempio la ricerca Itaten.

La ricerca Itaten³ (1996) ha studiato le forme insediative del territorio italiano partendo dal presupposto che le identità locali qualificano il modello di sviluppo urbano e territoriale italiano. La ricerca fu promossa dalla Direzione generale del Coordinamento territoriale del Ministero dei Lavori pubblici e sviluppata con il concorso dei ricercatori di sedici università italiane.

Alcuni caratteri originali del sistema Italiano riguardano i contesti locali e la rilevanza che questi hanno assunto nel contribuire allo sviluppo del territorio. Itaten ha introdotto la nozione di ambiente insediativo locale, incrociando i grandi quadri ambientali alla scala d'insieme con le strutture insediative e sociali alle scale di dettaglio.

³La ricerca nazionale Itaten è coordinata da A. Clementi, P.C. Palermo, G. Dematteis, delle Università di Chieti, Milano e Torino, ed organizzata in 16 unità regionali che fanno riferimento alle Università locali; l'unità che fa capo all'Università degli Studi di Firenze è coordinata da R. Innocenti. Si veda Urbanistica 106/1996, e A. Clementi, P.C. Palermo, G. Dematteis, (a cura), Le forme del territorio italiano, 2 voll., Laterza, Bari, 1996.

Il gruppo di ricerca Itaten ha assunto come ipotesi che l'individualità costituisca l'esito di un complesso intersecarsi dei mondi della natura, del tempo, delle forme fisiche sociali, dei processi di costruzione dello spazio e delle politiche territoriali adottate dalle amministrazioni centrali e locali.

Nella seconda metà del secolo scorso l'urbanizzazione e l'infrastrutturazione del territorio hanno determinato una tendenza alla "semplificazione" del paesaggio. Ne conseguono effetti di alterazione e destrutturazione del territorio con un grado di frammentazione crescente in relazione alla pressione antropica.

Le aree inedificate che rimangono tali sono sempre meno: stabilimenti industriali, autostrade, ferrovie, viadotti e nuova edificazione sono divenuti i protagonisti del paesaggio di oggi. Nel presente lavoro sono esaminate le dinamiche territoriali del territorio metropolitano di Bari. Nel territorio del Barese e abbastanza diffusamente in tutta la Puglia, le dinamiche legate a fenomeni di dispersione insediativa e di consumo di suolo sono sempre più forti negli ultimi anni. Inoltre le aree urbane di diversi comuni contigui continuano a diffondersi avvicinandosi l'un l'altra definendo una sorta di continuum urbano-territoriale. La ricerca Itaten individua questi centri come ambiti insediativi dinamici e interessati da diffusione manifatturiera e decentramento residenziale e produttivo. Spostandosi sull'area interna costiera il fenomeno è da ricondursi a utilizzo del territorio per questioni legate maggiormente all'agricoltura. Sempre secondo la ricerca Itaten, l'organizzazione infrastrutturale si dispiega lungo le strade statali (fenomeno comune alla dispersione insediativa) che determinano una duplice funzione accentratrice di attività residenziali ed economiche. Si osserva quindi un aumento dei collegamenti minori e i collegamenti dei centri disposti nella seconda fascia intorno all'area metropolitana.

Oltre alle peculiarità del sistema pugliese appena descritte, un aspetto importante da tener presente è la correlazione del fenomeno con il forte aumento demografico.

Anno	Abitanti
2002	1559821
2003	1564122
2004	1571689
2005	1594109
2006	1595359
2007	1596364
2008	1599378
2009	1601412
2010	1254461
2011	1258706

Tab. 1 Popolazione residente in Provincia di Bari dal 2002 al 2011(fonte ISTAT)

Dal 2002 ad oggi la popolazione residente in provincia di Bari è sempre crescente. Negli ultimi 2 anni sembra esserci una forte riduzione ma in realtà il dato dal 2010 in poi è relativo ad una estensione territoriale inferiore; la provincia di Bari ha “ceduto” parte del territorio alla nuova provincia BAT (Barletta - Andria – Trani).

Anno	Abitanti
2009	-
2010	391506
2012	392863

Tab. 2 Popolazione residente in Provincia di BAT fino al 2011(fonte ISTAT)



Fig. 5 Area urbana di Rutigliano e di Noicattaro

Queste dinamiche e variazioni del sistema dell'ambiente urbano in Puglia va a scontrarsi con un territorio che presenta delle fragilità. “La natura prevalentemente carsica di gran parte del territorio pugliese conferisce al reticolo idrografico superficiale della Regione, nella parte a sud del fiume Ofanto, caratteristiche di assoluta singolarità meritevoli di un alto livello di attenzione in relazione ai fenomeni legati alla pericolosità idraulica dei territori coinvolti, essendo implicita alla presenza di un ambiente carsico ad elevata permeabilità l’assenza pressoché totale di deflussi di magra anche su una scala temporale elevata. Proprio tale peculiarità ha contribuito ad aumentare il livello di vulnerabilità dei territori in quanto ha prodotto nel tempo un reiterato errore di interpretazione morfologica ed idraulica dei luoghi, nella convinzione mai dimostrata però che tale reticolo potesse considerarsi inattivo e quindi ostaggio indifeso di un’espansione urbanistica particolarmente “aggressiva” e non rispettosa dell’assetto naturale del territorio.”⁴

E' interessante capire come la ricerca Itaten abbia approcciato lo studio del fenomeno dell'urbanizzazione nel 1996 a livello nazionale ed ancor più importante, in questa tesi, è comprendere le modalità, le tecniche e metodologie usate in questo progetto di ricerca. Il progetto Itaten ha rappresentato un elemento importante di valutazione e comparazione.

⁴ Bonelli T., Fratino U., Romano L.(2010). Il complesso rapporto tra la città di Bari e le lame, uno sguardo al passato per un diverso futuro.

E' stato uno dei primi progetti basati sulle analisi territoriali utili al riconoscimento delle varie forme urbane, dei fenomeni di sprawl urbano e del consumo di suolo. Ovviamente l'approccio in questa tesi, dal punto di vista tecnologico, è totalmente diverso da quello di uno studio di molti anni fa.

3.3 IL SUOLO E IL TERRITORIO

Nella Carta Europea del Suolo del 1972 il suolo è definito come uno dei beni più preziosi dell'umanità poiché esso consente la vita dei vegetali, degli animali e dell'uomo sulla superficie terrestre⁵. Tra le funzioni principali del suolo vi sono la produzione di biomassa, la produzione di legname per la combustione (ossia coltivazioni bioenergetiche considerate energie rinnovabili), lo stoccaggio, la filtrazione, la trasformazione dell'acqua e dei nutrienti, la produzione agricola e zootecnica dalla quale dipende l'alimentazione umana. Il suolo assume fondamentale importanza nel preservare la biodiversità, nel conservare il patrimonio geologico ed archeologico, nell'immagazzinare enormi quantità di carbonio riducendo le emissioni in atmosfera e, fornendo materie prime, è alla base di numerose attività umane. Una caratteristica importante del suolo è la sua non rinnovabilità nella scala temporale umana, infatti la sua velocità di degradazione è maggiore dei processi di formazione e rigenerazione. L'impermeabilizzazione del suolo provoca la riduzione della sua porosità favorendo il ruscellamento superficiale, causando erosioni e inibendo la capacità riproduttiva dello stesso.

Coprendo il suolo con materiali artificiali si determina un cambiamento di uso, si riduce la capacità di infiltrazione delle acque, si frammentano gli habitat, si interrompono spesso i corridoi ambientali per le specie selvatiche.

La perdita e il degrado del suolo sono legati primariamente all'urbanizzazione ed alla infrastrutturazione del territorio. Questi fattori rendono molto difficile, se non impossibile, il ripristino dello stato ambientale preesistente e mutano in maniera considerevole il paesaggio, sia dal punto di vista estetico che dal punto di vista

⁵ Consiglio d'Europa, Carta Europea del suolo, 1972.

ambientale. Il processo antropogenico che determina la progressiva e irreversibile trasformazione delle superfici naturali è detto proprio consumo di suolo.

Il processo di consumo di suolo si accompagna spesso a quello della suburbanizzazione (urban sprawl), ovvero all'estensione di una città su aree rurali o semi-rurali con trasformazione di spazi aperti in spazi costruiti e con conseguente crescita a lungo termine di conseguenze ambientali negative. In questo modo vengono a crearsi paesaggi con bassa densità abitativa, caratterizzati da nuove centralità funzionali esterne ai centri urbani compatti. Tale processo di crescita è spesso disordinato e non pianificato e determina modelli di espansione urbana inefficienti e insostenibili⁶.

Alla luce di queste considerazioni e prendendo atto della sostanziale irreversibilità del fenomeno, il consumo di suolo è preoccupante e non giustificato. A differenza del secondo dopoguerra, periodo in cui l'espansione edilizia era giustificata perché sinonimo di ricerca del benessere da parte di un paese prevalentemente rurale, oggi si continua a costruire nonostante la sostanziale stabilità demografica degli ultimi anni. Basti pensare ad esempio che in Italia si stima il 10% di urbanizzazione media nazionale (come se l'intera superficie dell'Emilia-Romagna fosse edificata)⁷. La quantificazione di queste aree è però non accertabile con grande precisione, dato che in Italia mancano dati aggiornati e affidabili sul consumo di suolo e sulla disponibilità di suoli liberi.

Una recente ricerca promossa dall'Università dell'Aquila a seguito del terremoto ha fornito dati più puntuali. Nel territorio indagato (il 44% della superficie nazionale), tra gli anni '50 e il 2000, si è avuto un incremento della superficie urbanizzata mediamente del 500% e la densità di urbanizzazione (ovvero il rapporto tra la superficie urbanizzata e la superficie comunale) si è sestuplicata. Nelle regioni centro-meridionali i suoli urbanizzati sono quelli della fascia costiera, quelli basso-collinari e le conche interne.

Le ragioni di questa tendenza possono essere diverse a seconda dei contesti. In Emilia Romagna si registra una omogeneità di urbanizzazione dovuta, molto probabilmente alla

⁶ Giuseppe Mazzeo, Dall'area metropolitana allo sprawl urbano: la disarticolazione del territorio, TeMa 04.09, Napoli, 2009.

⁷ FAI e WWF, Terra rubata, viaggio nell'Italia che scompare, le analisi e le proposte di FAI e WWF sul consumo di suolo, 2012.

vivacità del tessuto economico; in Sardegna l'incremento urbano è legato alle attività turistiche; nel Lazio lo sviluppo urbano si legge intorno a Roma dove il notevole carico residenziale e di servizi erode in rapida progressione il paesaggio storico della campagna romana e lambisce i contrafforti dell'Appennino⁸.

Altre ragioni sono da ricondurre al dilagare delle costruzioni di seconde case, alle politiche di assistenza economica alle "aree marginali", alla propensione dei comuni ad incassare tasse ed oneri provenienti dai permessi di costruire e dagli edifici per sostenere i servizi pubblici, alla tendenza degli operatori privati a capitalizzare in beni immobili, etc.

Negli anni '80 i piani urbanistici hanno per troppo tempo assecondato questo fenomeno, cambiando la destinazione d'uso di molti terreni da agricolo in edificatoria, aumentandone il valore sul mercato immobiliare (valore ovviamente maggiore rispetto a quello agricolo). Si trattava di terreni prossimi agli insediamenti pre-esistenti, accessibili alle maglie stradali, di terreni meglio esposti e con morfologia agevole. Negli anni '90 la strumentazione urbanistica classica è stata revisionata e il Piano Comunale è stato suddiviso nella sua parte strutturale e in quella operativa. Con la Legge 142/90 fu introdotto l'Accordo di Programma che prevedeva la negoziazione pubblico-privata per le modificazioni edificatorie ed infrastrutturali e il DL 504/92 istituì l'Imposta Comunale sugli Immobili (ICI), una delle entrate più importanti nel bilancio dei comuni italiani che hanno avuto interesse alla conversione urbanistica ed edilizia per il proprio territorio da parte dei privati al fine di incrementare gli introiti derivanti da tale imposta.

Questo però non ha portato grossi benefici, e la "moda" delle costruzioni abusive si è allargata contribuendo a consumare il suolo. A partire dagli anni '60/'70, la voglia di avere una casa e il mancato controllo territoriale hanno portato alla costruzione di immobili (anche di seconde case o case al mare) senza autorizzazioni o in aree dichiarate inedificabili. Per sanare questa situazione dilagante in Italia, si è avviata la corsa ai condoni edilizi. I tre condoni edilizi (1985, 1994, 2003) hanno legalizzato ampliamenti e sopraelevazioni di edifici, intere lottizzazioni, seconde case; realizzazioni queste relative ad un lasso di tempo sempre maggiore fino ad una data sempre più vicina a quella del

⁸ FAI e WWF, Terra rubata, viaggio nell'Italia che scompare, le analisi e le proposte di FAI e WWF sul consumo di suolo, 2012.

condono. Tale attività è stata giustificata da motivazioni finanziarie poiché avrebbe contribuito a rimpinguare le casse dello Stato; nella realtà dei fatti, invece, tale attività di sanatoria ha avuto un costo superiore a quello degli introiti da essa derivanti. Un aspetto importante dell'ultimo condono è legato alla possibilità di sanare cambiamenti di destinazione d'uso avvenuti illegittimamente: alle prime avvisaglie della crisi, edifici sorti come capannoni industriali hanno subito una variazione funzionale sanata con il condono del 2003. È quanto avvenuto in maniera cospicua nell'area Padana: si conta un consumo di suolo per abusivismo pari a 11000 ettari, come se l'intero territorio del comune di Roma sia stato ricoperto da un'unica colata di cemento.

Tuttavia, un importante controllo sull'abusivismo edilizio è stato avviato contestualmente alle verifiche catastali del 2008, confrontando i dati catastali con immagini satellitari con conseguenti elaborazioni dei dati. Questa operazione ha evidenziato oltre 2 milioni di edifici fantasma sull'intero territorio nazionale a dimostrazione del fallimento della cultura delle sanatorie.

Anche la legge obiettivo 443/2001, contenente norme, procedure e strumenti per individuare, autorizzare e realizzare le infrastrutture strategiche, ha contribuito a favorire un incontrollato consumo di suolo.

Alcuni stati Europei hanno intrapreso iniziative utili al contenimento del consumo di suolo.

La Germania è stata una delle prime nazioni ad occuparsi del consumo di suolo. Risale al 1985 l'individuazione della prima strategia per la tutela dei suoli e al 1987 la definizione delle azioni per il contenimento dei suoli. Si tratta di una legge che punta principalmente alla prevenzione, poiché prevede il trattamento delle cause cercando di ridurre/evitare la riduzione della funzione naturale del suolo. La legge prevede città compatte, l'accorpamento di infrastrutture, l'individuazione di aree di compensazione naturale, la riconduzione alla naturalità, un utilizzo migliore delle aree, il contrasto del fenomeno della sub urbanizzazione. Quattro sono i punti strategici: la scelta di nuova occupazione di aree deve essere sostenuta da un quadro attendibile dei costi economici e sociali; gli strumenti economici e fiscali devono completare quelli della pianificazione urbanistica e

territoriale aumentandone l'efficacia dell'azione (per disincentivare l'occupazione delle aree libere si interviene sulla tassazione degli immobili); deve essere garantita la cooperazione tra gli enti locali; devono essere promossi progetti pilota. Nel 2004 sono stati approvati 300 progetti pilota con il Programma REFINA il quale ha visto coinvolti 100 soggetti tra istituti scientifici, amministrazioni pubbliche e associazioni ambientaliste. Al 2006 sono stati avviati e finanziati dal governo federale 116 progetti⁹.

In Gran Bretagna nel 1991 è stata emanata la Legge per la Pianificazione e la Compensazione che attribuisce grande importanza ai Piani Urbanistici Locali quali strumenti settoriali (il decentramento amministrativo si pone l'obiettivo di superare la frammentazione dei compiti e le sovrapposizioni nella gestione del territorio)¹⁰. Per il contenimento della dispersione insediativa e per contenere il consumo di suolo i piani urbanistici devono prevedere la definizione di green belts (cinture verdi che circondano i centri urbani) costringendo la città in confini non valicabili per l'espansione edilizia. La cintura verde si aggiunge ad altro verde e mantiene una separazione tra una città e l'altra e incoraggia il riutilizzo delle aree urbanizzate abbandonate. La legge prevede che le green belts, una volta approvate, sono "permanenti" e non possono essere ridotte o alterate a meno di circostanze eccezionali previa modifica degli strumenti di pianificazione locale. Ovviamente nelle cinture non è possibile realizzare nuovi edifici a meno che non siano destinati all'agricoltura, alla silvicoltura, agli sport all'aperto e alle attività ricreative. E' invece possibile realizzare delle integrazioni degli edifici già esistenti, rispettando le specificità costruttive del centro urbano ed è possibile realizzare interventi più estesi opportunamente pianificati.

In Inghilterra è inoltre attivo un database dei suoli già urbanizzati, il National Land Use Database.

⁹ Georg Josef Frisch, 30 ha/giorno. Le politiche di contenimento delle aree urbane in Germania, 13 marzo 2005.

¹⁰ FAI e WWF, Terra rubata, viaggio nell'Italia che scompare, le analisi e le proposte di FAI e WWF sul consumo di suolo, 2012.

Anche l'Italia dovrebbe mettere in campo azioni concrete in tal senso e il decreto legislativo sul consumo di suolo (ddl del 15 giugno 2013) rappresenta un segnale incoraggiante.

3.4 IL CONSUMO DI SUOLO

Il consumo di suolo, strettamente legato alla dispersione insediativa, è un fenomeno da monitorare e mitigare. L'impermeabilizzazione comporta varie problematiche, a partire dalla riduzione dell'assorbimento di pioggia, con effetti diretti sul ciclo idrologico e indiretti sul microclima, producendo un aumento del rischio inondazioni.

Diversi studi hanno valutato, mediante differenti metodologie, il fenomeno di impermeabilizzazione del territorio cercando di quantificarlo.

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) ha condotto un'indagine a livello nazionale sull'andamento del consumo di suolo dal 1956 al 2010. Secondo l'ISPRA in Italia vengono consumati 8 mq di suolo al secondo. I dati si riferiscono alla superficie consumata, incluse aree edificate, coperture del suolo artificiali (cave, discariche e cantieri) e tutte le aree impermeabilizzate, non necessariamente urbane (infrastrutture) ed escludendo le aree urbane non coperte da cemento e non impermeabilizzate.

L'Italia è al di sopra della media europea e i dati storici dimostrano che si tratta di un processo che negli ultimi decenni non ha avuto inversione di tendenza. Si è passati dal 2,8% di consumo di suolo del 1956 al 6,9% del 2010 (+4%). La media indica un consumo di oltre 7 metri quadrati al secondo per oltre 50 anni. Negli anni 90 si è arrivati ad un picco di quasi 10 metri quadrati al secondo. Negli ultimi 5 anni il dato è leggermente inferiore ma il fenomeno è sempre in crescita con una velocità superiore agli 8 metri quadrati al secondo. Secondo questi dati dell'ISPRA ogni 5 mesi viene cementificata una superficie pari a quella del Comune di Napoli (117 km²) e, ogni anno, una superficie pari alla somma di quella di Milano e quella di Firenze. Considerando l'intera Nazione, il consumo di suolo, pari a circa 8.000 km² nel 1956 è aumentato fino ad

oltre 20.500 km² nel 2010. Raffrontando questi dati con la crescita demografica, nel 1956 c'era un consumo di suolo pari a 170 m² per ogni abitante mentre nel 2010 più di 340 m². Tra le regioni con valori più allarmanti ci sono Liguria e Lombardia che nel 1956 avevano il 5% di territorio impermeabilizzato e la Puglia il 4%. Nel 2010 la Lombardia ha superato la soglia del 10% ed è la prima regione italiana in questa “speciale” classifica; tutte le altre regioni (14 su 20) oltrepassano di molto il 5%.

Oltre all'indagine ISPRA ci sono diversi studi sul consumo di suolo. Secondo un precedente rapporto del 2011 della Commissione europea “Overview on best practices for limiting soil sealing and mitigating its effects” il consumo di suolo per cittadino in Europa è aumentato del 15% tra il 1990 e il 2006 e il 2,3% del territorio europeo è cementificato. Tra il 1990 e il 2000, si è stimato un consumo pari a 275 ettari al giorno in Europa pari a circa 1.000 km² per ogni anno. Questo implica che ogni dieci anni un'area delle dimensioni di Cipro viene asfaltata. Anche se negli ultimi anni la tendenza si è leggermente ridotta, con valori di 252 ettari al giorno, il tasso di consumo di suolo è ancora preoccupante. Tra il 2000 e il 2006, l'aumento medio di aree artificiali nella UE era del 3%, con valori superiori al 14% per Cipro, Irlanda e Spagna.

In riferimento alla questione nazionale, l'ISTAT conferma che tale fenomeno ha assunto entità preoccupanti. L'ISTAT nel Rapporto 2012 fornisce dati che dimostrano come il consumo di suolo in Italia sia maggiore rispetto al resto d'Europa: il 7,3% del territorio contro una media Ue pari al 4,3%. L'estensione di centri e nuclei abitati, complessivamente pari a circa 20.300 km² è cresciuta dell'8,8% fra il 2001 e il 2011, ovvero di una superficie pari a quella della provincia di Milano. Lombardia (12,8%) e Veneto (12,7%) sono le regioni in cui è più estesa la superficie cementificata; Basilicata (+19%) e Molise (+17%) quelle in cui l'urbanizzazione è cresciuta di più.

Con l'aumentare del consumo di suolo anche il settore agricolo viene intaccato poiché il cemento prende il posto dei terreni coltivabili. Le stime (secondo il rapporto della Commissione Europea) indicano che tra il 1990 e il 2006, 19 Stati membri hanno perso una capacità di produzione agricola complessiva pari a 6,1 milioni di tonnellate di

frumento (l'1% del loro potenziale agricolo, circa 1/6 del raccolto annuale in Francia, il maggior produttore d'Europa). Numeri tutt'altro che insignificanti, visto che per compensare la perdita di un ettaro di terreno fertile in Europa, servirebbe la messa in uso di un'area dieci volte maggiore.

Altri dati si riscontrano nel dossier sul consumo del suolo "Terra Rubata - Viaggio nell'Italia che scompare" (Fondo Ambiente Italiano (FAI), WWF). I dati sul territorio nazionale indicano un consumo di suolo pari ad oltre 75 ettari al giorno (secondo ISPRA sono circa 70). Nelle Regioni analizzate (Abruzzo, Emilia Romagna, Friuli Venezia Giulia, Lazio, Liguria, Marche, Molise, Puglia, Sardegna, Umbria, Valle d'Aosta) è evidente una forte differenza tra aree urbane presenti negli anni 50 e dopo il 2000. Dal dossier emerge che tra le 11 regioni considerate, il consumo di suolo negli ultimi 50 anni avanza progressivamente passando da un incremento minimo di circa il 100% in Umbria, Liguria, Valle d'Aosta e Friuli, fino a oltre il 400% in Molise, Puglia e Abruzzo, e oltre il 500% in Emilia Romagna. In particolare, in Puglia la copertura urbanizzata attuale è ormai quasi sei volte maggiore di quella degli anni del dopoguerra. Secondo questi dati la Puglia ha un ritmo di consumo di suolo con una media pari a 5 ettari al giorno.

Secondo uno studio di "Ambiente Italia" la situazione a livello regionale è quella riportata in tabella 3.

	Superfici artificiali (%)	Superfici artificiali in kmq
Valle d'Aosta	2	70
Piemonte	7,6	1.900
Liguria	6,3	340
Lombardia	14,1	3.400
Trentino Alto Adige	2,8	390
Friuli Venezia Giulia	9,4	740
Veneto	11,3	2.100
Emilia Romagna	9,1	2000
Toscana	5,6	1.300
Umbria	4,1	350
Marche	5,5	540
Lazio	9,1	1.500
Abruzzo	3,4	360
Molise	1,6	70
Campania	10,7	1.450
Basilicata	2,1	210
Puglia	5,9	1.100
Calabria	5,8	870
Sicilia	7,4	1.900
Sardegna	3,7	900
Italia	7,1	21.490

Tab. 3 Il consumo di suolo nelle regioni italiane. Fonte: Ambiente Italia 2011 - elaborazione Legambiente 2010.

Altri dati interessanti sono quelli dell'Agenzia Ambientale Europea: nonostante in Italia dal 1991 al 2001 sia stata registrata una stabilità demografica, nello stesso periodo le città sono cresciute di 8.500 ettari all'anno. Paradossalmente, le città hanno continuato ad espandersi persino in quei comuni che tra il 1951 e il 2011 si sono svuotati a causa dell'emigrazione fino a crescere di oltre 800 metri quadri per ogni abitante perso.

Questo porta a fare delle riflessioni importanti sul ruolo della Pianificazione territoriale e sulla attuazione e gestione degli strumenti urbanistici.

In diversi casi l'andamento della curva di popolazione è in controtendenza rispetto alla crescita delle aree a "contaminazione" antropica. Fatti salvi i pochi casi di completamento di nuclei esistenti, che nelle aree a maggiore densità rasentano la saturazione, il dossier mette in evidenza che la presenza di cemento provoca fenomeni di accrescimento del reticolo urbano con nuclei di abitazioni sparpagliati rispetto al centro cittadino. Nasce quindi una distribuzione con caratteristiche più casuali e disordinate rispetto a quelle osservate nei decenni passati con diversi punti del territorio edificati distanti e non connessi.

D'altronde l'attività edilizia ha sempre rappresentato un elemento trainante nell'ambito dell'economia nazionale ed è anche per questo che sono state costruite più case di quelle necessarie. La mancata pianificazione di queste aree ha causato notevoli problemi quali l'assenza di luoghi di aggregazione urbani, infrastrutture di collegamento, ecc. Se si prende in esame il rapporto tra superfici coperte da edifici e quelle destinate ad usi accessori, si rileva che questo negli insediamenti storici si attestava tra il 70% e il 90%, mentre negli insediamenti urbani moderni è sceso a valori inferiori anche al 20%, con enormi quote di territorio destinate a parcheggi.

Tutti questi valori meriterebbero una crescita demografica proporzionale ma, considerando i dati sulla popolazione, le città continuano ad espandersi immotivatamente. Anche i territori comunali che tra il 1951 e il 2011 si sono svuotati a causa dell'emigrazione hanno mostrato indicatori controversi, come il dato di 800 metri quadri di consumo di suolo per ogni abitante perso. In diverse regioni italiane i dati sul consumo negli anni sono quasi inspiegabili ma è utile citare anche realtà virtuose. Secondo il FAI e

il WWF la maglia nera del consumo di suolo pro-capite va alla Sardegna che passa da circa 49 m² per ogni abitante, negli anni '50, a 10 volte di più dopo il 2000. Tra le altre regioni insieme alla Puglia, abbiamo valori 5 volte superiori anche in Molise, Emilia Romagna e Abruzzo. I livelli più bassi si riscontrano in Umbria e Valle d'Aosta con fattori di incremento inferiori a 2.

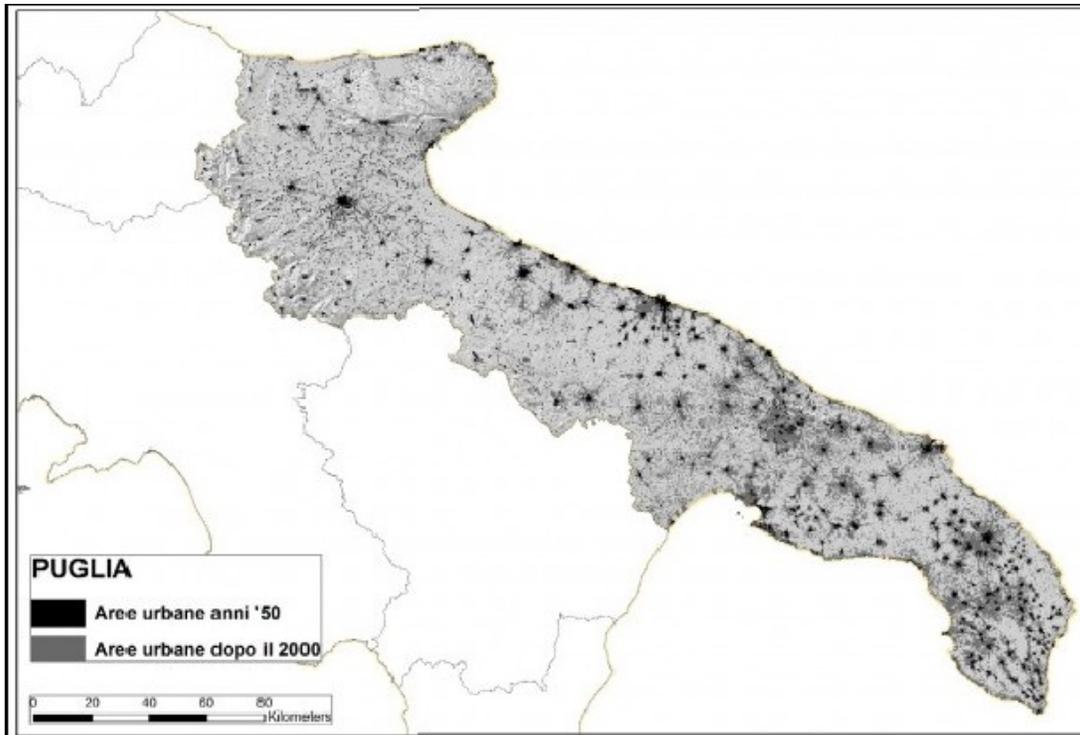


Fig. 6 Consumo di suolo in Puglia. Elaborazione di Bernardino Romano (Dossier sul Consumo di suolo 2012 “Terra rubata - Viaggio nell'Italia che scompare”)

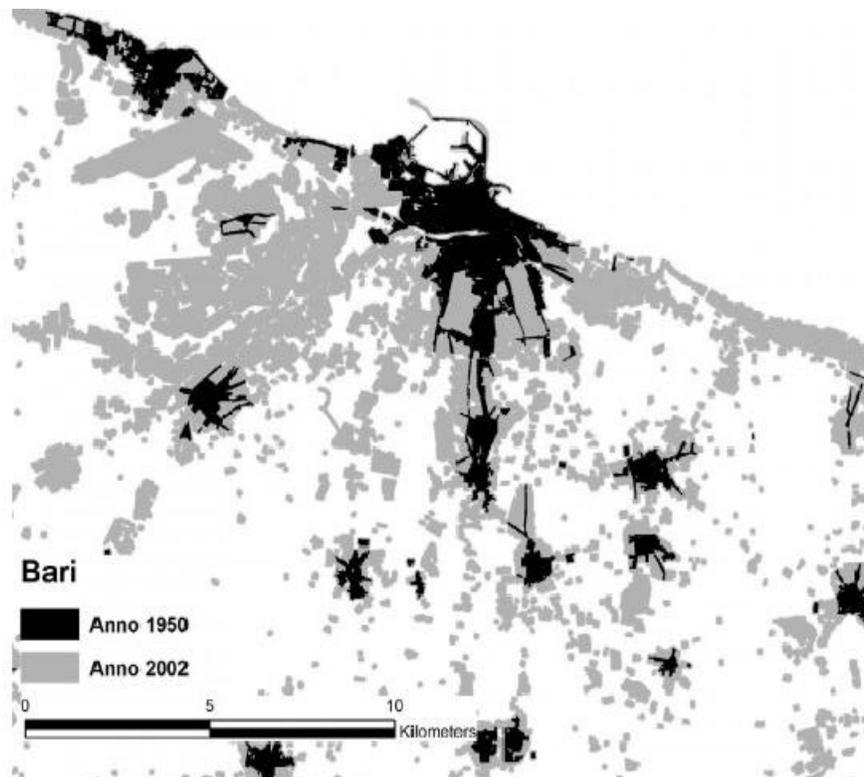


Fig. 7 Consumo di suolo nei pressi della Città di Bari. Elaborazione di Bernardino Romano (Dossier sul Consumo di suolo 2012 “Terra rubata - Viaggio nell'Italia che scompare”)

Il fenomeno del consumo di suolo è stato affrontato anche in un altro studio ISTAT “Le interrelazioni del settore agricolo con l'ambiente” (aprile 2011)”. In questo studio viene trattato il tema della perdita di suolo agricolo evidenziando la mancanza di un sistema di monitoraggio e di controllo in grado di fornire la valutazione del fenomeno. Nello studio viene evidenziato come l’espansione delle aree urbanizzate, con conseguente trasformazione delle precedenti destinazioni d'uso, è un processo senza fine in Italia. Inoltre anche l'ISTAT sottolinea come la città diffusa rappresenta ormai un paesaggio caratteristico di vaste aree del territorio nazionale e lo sprawl urbano tende ad eliminare la distinzione tra città e campagna con elevati costi sociali, economici e ambientali senza essere accompagnato da reali esigenze abitative. Il territorio diviene sempre più

frammentato con un progressivo abbandono dei campi agricoli e con un proliferare di capannoni e “seconde case”.

Analizzando anche un altro fonte (Eurostat) si trovano valori concordi in altri stati Europei. Alcune nazioni stanno cercando di porre un freno al fenomeno, cercando di mettere in campo azioni concrete in tal senso.

La Germania e la Gran Bretagna hanno fissato severi limiti per impedire nuove costruzioni su terreni agricoli, invece in Italia l’urbanizzazione continua ad avanzare senza una forte e reale opposizione.

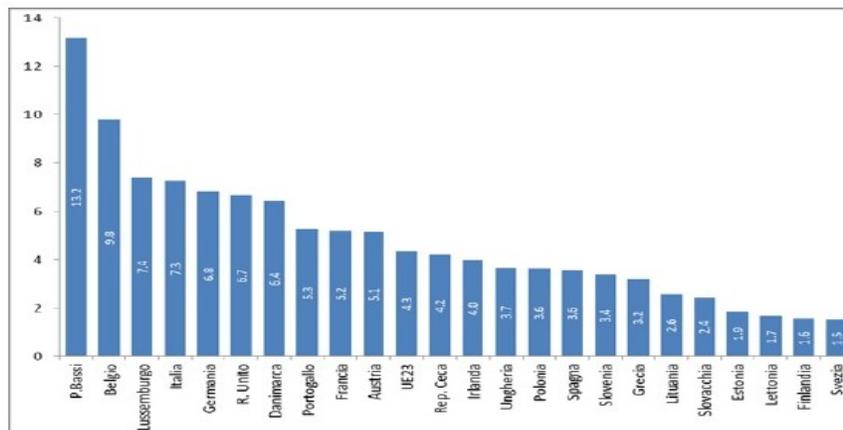


Fig. 8 Territorio con copertura artificiale (anno 2009). Fonte Eurostat, indagine LUCAS

Tutti gli studi sul consumo di suolo qui menzionati, delineano uno stesso andamento preoccupante ma, anche se in accordo sulla definizione del trend, hanno dei valori numerici anche abbastanza differenti.

Questo rappresenta uno dei punti fondamentali della tesi, nella quale viene fatta una lunga trattazione sulle metodologie utili al monitoraggio del consumo di suolo.

3.4.1 GLI APPROCCI LEGISLATIVI

In diversi paesi europei sono state prese iniziative per contrastare il consumo di suolo e recentemente anche in Italia è in atto una evoluzione. Già un anno fa il Governo Monti (ormai ex nel momento in cui scrivo) ha presentato un disegno di legge quadro in materia di "valorizzazione delle aree agricole e di contenimento del consumo del suolo". Infatti, il 14 settembre 2012 è stato presentato dall'ex presidente del consiglio Mario Monti e dall'ex ministro dell'agricoltura Mario Catania il disegno di legge che si basa sulla determinazione dell'estensione massima di superficie agricola edificabile sul territorio nazionale. La proposta normativa prevedeva che la Conferenza Unificata (Stato-regioni e Stato-città ed autonomie locali) dovesse determinare in tempi rapidi i valori di superficie agricola o forestale consumabile. Il valore doveva essere definito tenendo conto dell'estensione e della localizzazione dei terreni agricoli rispetto alle aree urbane, dell'estensione del suolo che risulta già edificato, dell'esistenza di edifici inutilizzati, dell'esigenza di realizzare infrastrutture e opere pubbliche e della possibilità di ampliare quelle esistenti, invece che costruirne di nuove. La proposta prevedeva che, in mancanza di intesa, queste decisioni sarebbero state prese dal Governo.

Gli amministratori locali hanno da subito opposto resistenze, rivendicando un ruolo importante in tema di pianificazione territoriale ed urbanistica (che è materia di competenza degli enti locali). Inoltre, l'art. 9 del decreto, prevedeva di bloccare in via temporanea tutti i cambiamenti di destinazione d'uso di superfici agricole. Questo ha creato non pochi malumori negli amministratori, soprattutto regionali.

Andando temporalmente avanti, in giugno 2013 il nuovo Consiglio dei Ministri ha approvato il disegno di legge per contenere il consumo di suolo. Lo scopo è sempre quello di contenere il consumo di suolo, di valorizzare il suolo non edificato, promuovere l'attività e valorizzare il suolo come risorsa da tutelare anche ai fini di mitigazione prevenzione del rischio idrogeologico. Anche in questo caso però i tecnici delle Regioni e delle Province autonome l'hanno bocciato, evidenziando il rischio di un blocco degli strumenti urbanistici vigenti e perché lo ritengono privo di una visione strategica e

complessiva del territorio. Il disegno di legge verrà sottoposto al parere della Conferenza unificata.

Tra gli aspetti positivi del disegno di legge sono da considerare

- l'impossibilità di modificare la destinazione d'uso dei terreni agricoli per i quali sono stati erogati aiuti di stato o comunitari per almeno dieci anni dall'ultima assegnazione
- l'attribuzione di premialità e priorità di finanziamenti statali e regionali per progetti che prevedano recupero di nuclei rurali, mediante ristrutturazione e restauro di edifici esistenti e conservazione ambientale del territorio.

Ciononostante, in linea generale, il Decreto ha ricevuto molte critiche ed è stato definito da molti carente e poco efficace.

Dietro a queste “buone intenzioni”, ci sono delle operazioni che sembrano contraddire i principi enunciati. E' stato infatti approvato un provvedimento dal titolo "Disposizioni per favorire la costruzione e la ristrutturazione di impianti sportivi anche a sostegno della candidatura dell'Italia a manifestazioni sportive di rilievo europeo o internazionale". Il comma 2 dell' articolo 4 prevede che "il progetto per la realizzazione di complessi multifunzionali può includere ambiti da destinare ad attività residenziali, direzionali, turistico-ricettive e commerciali", il tutto in deroga agli strumenti urbanistici. Questo vuol dire che alcuni impianti, anche di grandi dimensioni, possono essere realizzati “saltando” il decreto sul consumo di suolo (una evidente contraddizione).

Un altro aspetto molto criticato del Decreto è la mancanza di un censimento delle aree edificabili inattuate nei comuni italiani. Queste dovrebbe essere viste come prioritarie rispetto a suoli agricoli.

Quindi, allo stato attuale, il problema del consumo di suolo è stato affrontato dai due governi ponendo soprattutto norme e restrizioni che tendono a limitare l'espansione urbanistica. Gli enti locali spesso fanno cassa proprio su concessioni edilizie e oneri di urbanizzazione e, in un periodo di risorse statali trasferiti ai Comuni sempre meno larghe, tendono a vedere questa iniziativa come un ulteriore freno.

Un aiuto però, guardando bene le cose, può venire da una ulteriore tassa sugli immobili. L'IMU potrebbe essere un disincentivo per la realizzazione di nuove abitazioni. Anche in questo caso però sembra che la norma debba essere nuovamente modificata. Probabilmente, almeno in questa fase, l'unico modo per migliorare il problema del consumo di suolo è usare la leva fiscale per premiare comportamenti virtuosi e non per tutelare comportamenti dannosi per la collettività e per l'ambiente.

3.4.2 COME MISURARE IL CONSUMO DI SUOLO

Il Presidente di ISPRA De Bernardinis ha evidenziato che non è ancora stato definito come affrontare il problema del consumo del suolo. L'individuazione di soluzioni del problema non può prescindere dalla corretta misura del fenomeno e dalla condivisione con i cittadini dei risultati della misura, delle cause e degli impatti. La consapevolezza della gravità del fenomeno del consumo di suolo è alla base di scelte di tipo politico che i cittadini sono chiamati a fare. Ad oggi, come evidenziato nei precedenti capitoli, non risulta chiaro come misurare l'entità di consumo di suolo. E' inoltre importante definire indicatori quantificabili descrivendo in maniera dettagliata metodi, tecniche e procedure per calcolarli. Sulla misura del consumo del suolo possono essere adottati metodi distinti che producono risultati differenti e quindi la loro armonizzazione è fondamentale per poter confrontare i dati. Le metodologie che possono essere adottate per misurare il consumo di suolo possono essere divise in due classi: di tipo cartografico o campionario. L'ISPRA oltre ad aver fatto un'analisi sul territorio nazionale ha anche prodotto una valutazione comparativa tra i dati di consumo di suolo in Italia prodotti con metodo campionario (proprio da ISPRA) che ha classificato oltre 150.000 punti a livello nazionale, e i dati Soil Sealing (metodo cartografico) prodotti a livello europeo dall'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA) attraverso la elaborazione di immagini satellitari. Questa analisi ha evidenziato una buona coerenza tra i dati ottenuti con le due metodologie ma le differenze rimangono. E' chiaro che molto dipende dalla scala di analisi del fenomeno e dai dati di base. Considerare una carta come la Corine Land Cover al 1:100.000 piuttosto che una carta di uso del suolo derivata da CTR 1:5.000 può essere

molto rilevante. Sarebbe opportuno definire allora quali siano le specifiche utili per una misurazione del genere a seconda della scala di analisi. L'ideale sarebbe avere stesse specifiche e stesse fonti di dati nelle diverse Regioni Italiane e costruire per aggregazione il dato Nazionale. Però in Italia ci sono diverse regioni che non hanno ancora una Carta Tecnica Regionale e sono pochissime quelle che hanno un calendario di aggiornamento ben definito. In altri casi, nessuna prevede di aggiornare la cartografia con una frequenza di aggiornamento compatibile con le esigenze di monitoraggio del consumo del suolo.

Anche per queste motivazioni, in questo lavoro di tesi viene proposta una metodologia, basata su immagini satellitari, utile per la misurazione del consumo di suolo alla scala vasta (sovracomunale) che supera i confini e i limiti della gestione cartografica del dato in Italia. Questa metodologia oltre alla misurazione del fenomeno potrebbe anche rappresentare un utile strumento di monitoraggio, consentendo alle amministrazioni locali di verificare l'impatto delle proprie attività di pianificazione territoriale. Monitorare questi fenomeni mediante le immagini multispettrali da satellite consente di effettuare acquisizioni ripetute nel tempo con costi contenuti e di usare procedure standardizzate per l'estrazione di informazioni da questi dati. Il fatto di poter elaborare anche immagini storiche permette di superare il limite di non aver mai raccolto ed elaborato dati fino ad oggi.

3.4.3 L'APPROCCIO PER LO STUDIO DELL'URBANIZZAZIONE E DEL CONSUMO DI SUOLO

La valutazione dei complessi fenomeni di urbanizzazione, del consumo di suolo comporta necessariamente l'impiego di tecniche e strumenti di lettura di processi spaziali e di analisi geografica. Per poter studiare il fenomeno è necessario ovviamente conoscere bene i dati da utilizzare e la modalità di acquisizione degli stessi. Tantissimi studi inerenti l'evoluzione di fenomeni territoriali nel tempo si sono basati sulla cartografia ufficiale IGM. Oggi però con la disponibilità di nuovi supporti cartografici (rilievi aerei ed immagini da satellite), con il movimento open data¹¹ sempre più forte, con banche dati

¹¹Gli open data sono alcune tipologie di dati liberamente accessibili a tutti, senza restrizioni di copyright, brevetti o altre forme di controllo che ne limitino la riproduzione.

cartografiche consultabili via web (come ad esempio il Geoportale Nazionale del Ministero dell'Ambiente), è possibile intraprendere un nuovo modo costante e preciso per la lettura dei fenomeni territoriali.

A livello europeo sono nate diverse iniziative finalizzate alla valutazione dell'urbanizzazione e dell'impermeabilizzazione del territorio a diverse scale. Il programma Gmes (Global monitoring for environment and security) e il progetto Corine land cover 2006 ne sono due esempi.

Nel programma Gmes l' Agenzia Europea per l'Ambiente (EEA) ha commissionato la produzione della mappa delle aree impermeabilizzate dei 32 paesi membri dell'EEA più Albania, Bosnia-Erzegovina, Croazia, Macedonia, Montenegro e Serbia. L'area investigata è pari a circa 5,8 milioni di Km². La mappa è stata estratta dai dati satellitari multitemporali (2006 +/- 1 anno) SPOT e IRS mediante procedura di image processing. L'output finale è costituito da una mappa con due classi: built up e Non-built up area con relativo livello di impermeabilizzazione (da 0 a 100%).

Un approccio come il Gmes è moderno e confacente alle possibilità tecnologiche odierne; nel corso degli anni i dati spaziali e relative elaborazioni son passati dalla carta al digitale e il numero di informazioni spaziali a disposizione sono sempre in aumento.

Nel presente lavoro di tesi il dato satellitare (insieme anche a cartografia tecnica, ortofoto etc.) costituisce la base principale dell'informazione. Questo, come meglio indicato in seguito, permette di avere informazioni sugli oggetti al suolo sia spaziali che spettrali. La firma spettrale¹² di un oggetto costituisce un elemento in più per la corretta classificazione del pixel. Per quanto riguarda il consumo di suolo l'approccio "classico", usato fino a qualche decennio fa, prevedeva la delimitazione "a mano" delle aree edificate su cartografia IGM. Ovviamente la delimitazione avveniva su cartografia di diversi periodi in modo tale da poter poi fare una change detection e quindi misurare la quantità di nuova area edificata dal tempo t1 al tempo t2.

¹²La firma spettrale è una caratteristica specifica di ogni materiale ed è definita per ogni combinazione di riflessi e assorbimenti delle radiazioni elettromagnetiche a diverse lunghezze d'onda.

L'approccio invece usato in questo lavoro prevede la classificazione del suolo mediante uso di indici spettrali e/o applicazioni di indici geostatistici su immagini telerilevate. Per quanto riguarda il consumo di suolo, uno degli indici analizzati per lo studio dell'urbanizzato è il BAI - Built-up Areas Index = $(blue - ir)/(ir + blue)$. Il BAI consente di individuare le superfici impermeabili, come asfalto e cemento ed è stato applicato su immagini satellitari di diversi periodi. La change detection, con relativi calcoli sul consumo di suolo, è stata fatta mediante strumenti GIS.

4 GLI STRUMENTI DI LAVORO

4.1 UBUNTU

La scelta del sistema operativo è ricaduta su una piattaforma Linux, qual è Ubuntu, poiché, oltre a altre qualità, permette un utilizzo più potente dei software GIS che sono stati utilizzati. Difatti, software come Grass/Qgis nascono sotto piattaforme Linux e ancor oggi in questo ambiente consentono maggiori performance rispetto ad un altro sistema operativo. Inoltre Ubuntu, a differenza di altre distribuzioni Unix, è più orientato verso un utilizzo user-friendly ed è “avvicinabile” anche da chi non possiede ancora una visione (seppur generica) del mondo Linux.

Ubuntu nasce come una distribuzione Linux nel 2004 ed è basata sulla distribuzione Debian. E' semplice nell'installazione e nel suo utilizzo ed ha un rilascio regolare (semestrale) delle nuove versioni. Rispetto a Debian, Ubuntu ha un orientamento più spiccato verso l'utilizzo desktop e un'attenzione maggiore al supporto dell'hardware dei portatili. Il nome Ubuntu deriva da una antica parola Zulu diffusa in varie parti dell'Africa e che corrisponde indicativamente al concetto di "umanità verso gli altri", a volte tradotto anche "io sono ciò che sono per merito di ciò che siamo tutti". La distribuzione Ubuntu Linux si prefigge l'obiettivo di portare nel mondo del software questo nobile concetto. Viene finanziata dalla società Canonical Ltd (registrata nell'Isola di Man), pur rimanendo in tutto e per tutto un software libero. L'ideatore dell'iniziativa e

titolare di Canonical è Mark Shuttleworth, un giovane imprenditore sudafricano diventato fiero sostenitore dell'open source, al cui servizio ha posto le sue risorse. Ubuntu è basata sull'ambiente desktop GNOME, dispone di più di 16.000 applicazioni, tra le quali software per la produttività personale, incluso OpenOffice.org, il browser web Mozilla Firefox e l'editor grafico GIMP ma anche client di posta elettronica, editor per la programmazione, giochi e molto altro. Esistono anche Kubuntu, Xubuntu, Edubuntu.

Ubuntu quindi è un sistema operativo open source basato sul kernel Linux. La comunità è fondata sull'idea insita nella filosofia di Ubuntu [<http://www.ubuntu-it.org/index.php?page=Filosofia>]: il software deve essere disponibile gratuitamente; gli strumenti del software devono essere disponibili agli utenti nella loro lingua madre a prescindere dalle loro abilità e gli utenti devono avere la libertà di personalizzare e modificare il software in qualunque modo lo desiderino. Per queste ragioni:

- Ubuntu non è a pagamento e non c'è nessun extra per alcuna "Enterprise Edition",
- Ubuntu comprende le migliori traduzioni e strutture d'accesso che la comunità del software Libero possa offrire, al fine di rendere Ubuntu utilizzabile dal maggior numero di utenti possibile.
- Ubuntu è rilasciato regolarmente a scadenze previste; una nuova versione è rilasciata ogni sei mesi. È possibile scegliere di usare la versione stabile o di sviluppo. Ogni edizione è supportata per almeno 18 mesi.
- Ubuntu è votata completamente ai principi del software Libero e Open Source; gli utenti sono incoraggiati all'uso, al miglioramento e alla diffusione del software Libero e Open Source.

La comunità di Ubuntu è composta da sviluppatori software, programmatori, tester, autori, tecnici, tester di documentazione, traduttori e più importante di tutti, dalle persone che usano Ubuntu nella vita di tutti i giorni.

4.2 GRASS

Grass è un software GIS di pubblico dominio distribuito gratuitamente sotto licenza GPL (General Public License - <http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>). Il progetto originale è

nato nel 1982 e da allora ha coinvolto nel suo sviluppo diverse agenzie federali e statunitensi, università e società private. Un ruolo guida nella gestione delle varie release e nell'integrazione dei comandi è stato svolto dal "U.S. Army - Construction Engineering Research Laboratory (USA-CERL)" che pubblica la sua ultima release nel 1992, provvedendo comunque ad integrarla con una serie di patch fino al 1995. Il lavoro di sviluppo è poi proseguito a livello universitario, prima nel 1997 alla Baylor University poi in Germania nel 1998 da Markus Neteler. Nel 1999 si è costituito il GRASS Development Team che rilascia sotto licenza GPL una prima versione beta di GRASS 5.0. Lo sviluppo è attualmente seguito all'IRST di Trento che è diventato il punto di riferimento a livello internazionale per lo sviluppo di GRASS.

4.2.1 LA STRUTTURA DEI DATI IN GRASS

Grass gestisce i dati all'interno di una cartella Database (usualmente chiamata Datagrass o Grassdata). In questa cartella sono contenuti tutti i dati geografici presenti sul computer (è comunque possibile ma non sempre utile tenere più database differenti su una sola macchina). All'interno di un database la struttura procede per via gerarchica in Locations e Mapsets:

- Location: costituisce una base di dati indipendente, caratterizzata da un proprio tipo di proiezione, un proprio ellissoide di riferimento e da un sistema di coordinate specifico, nonché da una propria Default Region¹³.
- Mapset: è la cartella di lavoro di ogni singolo utente.

Le proprietà definite a livello di Location (come sistema di riferimento, massima estensione geografia, etc...) vengono estese ad ogni Mapset contenuto. Ogni utente può modificare solamente i dati contenuti nel proprio Mapset. Indipendentemente dai Mapset personali, in ogni Location è sempre presente un Mapset speciale chiamato PERMANENT al quale ha accesso solo l'utente che ha creato la Location. Gli altri utenti avranno un accesso ristretto alla sola lettura (e quindi anche copiatura) dei dati.

¹³E' la massima estensione geografica che GRASS visualizzerà di default, dovrebbe comprendere i limiti della cartografia digitale introdotta. La Regione di default è caratterizzata anche da una propria risoluzione in direzione N-S e O-E con la quale GRASS opera sia nella visualizzazione che nella creazione di altre mappe. La risoluzione a cui si lavora acquista particolare importanza quando si lavora su dati di tipo fotografico.

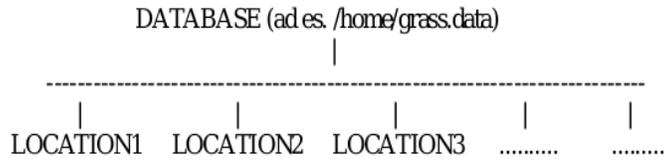


Fig. 9 struttura gerarchica del database

L'organizzazione delle Location e dei Mapset può variare da caso a caso. Un criterio potrebbe essere quello di definire la suddivisione di un Database in Location a seconda dell'area geografica.

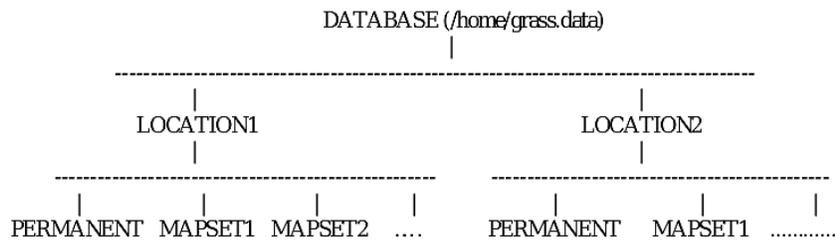


Fig. 10 struttura gerarchica database con location e mapset

Ogni volta che viene creata dall'utente una nuova Location, viene creato automaticamente un Mapset denominato PERMANENT, che può essere modificato solo dal creatore della Location e contiene diverse informazioni, quali ad es. le coordinate della regione di lavoro e la risoluzione delle carte raster. Gli altri Mapset della Location sono creati dall'utente, in numero illimitato e con qualunque nome. La suddivisione in Mapset può essere utilizzata per separare i diversi tematismi all'interno di una stessa Location, oppure per separare diversi territori comunali etc.

4.2.2 TIPI DI DATI

I dati con cui Grass è in grado di lavorare sono principalmente di due tipi:

- Raster

Sono informazioni memorizzate in matrici numeriche i cui elementi rappresentano ciascuno una porzione nota di forma rettangolare di territorio. Ad ognuna di queste celle è associato un valore numerico. Attraverso l'indicizzazione dei valori in un apposito file dove viene associato al numero una definizione testuale è possibile creare carte tematiche interrogabili (tipo di vegetazione, comune, nome dell'aggregato urbano, etc). I valori contenuti in un raster possono essere di tipo intero o con virgola mobile.

- Vettoriali

Vengono gestite in modo simile a delle carte raster ma il principio su cui si basano è completamente differente. In un file vettoriale vengono definite geometrie di diversa natura (come linee, punti, poligoni, etc...) mediante le coordinate dei singoli punti che le definiscono.

Ad ogni oggetto di una carta raster, o meglio alle celle che compongono l'oggetto, viene attribuito un solo valore di categoria ed eventualmente un' etichetta descrittiva. La non assegnazione di una categoria comporta l'assegnazione automatica di un valore particolare definito null.

Invece il dato vettoriale è costituito da un insieme di caratteristiche geometriche e di attributi. La geometria di un oggetto, riproducibile mediante le forme geometriche elementari punto, linea e poligono, è riconducibile ad una delle cinque tipologie seguenti:

- Point (punto): per rappresentare gli elementi puntiformi (punti quotati, pozzi, ecc.). Ogni punto è rappresentato da una coppia di coordinate.
- Line (linea): per rappresentare elementi lineari (strade, fiumi, linee elettriche, ecc.). Ogni linea è costituita da una spezzata. I due punti alle estremità sono definiti nodi, mentre i punti intermedi sono definiti vertici. Ogni linea viene memorizzata mediante una sequenza di coppie di coordinate in corrispondenza dei nodi e dei vertici della spezzata.
- Boundary (bordo). Per rappresentare, anche parzialmente, i bordi di aree chiuse (laghi, piante di edifici, appezzamenti di terreno, ecc.). E' una spezzata

memorizzata mediante una sequenza di coppie di coordinate in corrispondenza dei nodi e dei vertici.

- Centroid (centroide). E' un elemento puntiforme all'interno di un'area chiusa in corrispondenza del quale vengono inseriti gli attributi dell'area. Ogni centroide è rappresentato da una coppia di coordinate.
- Area (area). E' l'insieme di un bordo di area (boundary) completo, vale a dire chiuso, e del relativo centroide (centroid).

La gestione dei vettoriali in GRASS avviene secondo topologia ed ogni incongruenza viene valutata come un errore. La geometria è salvata in uno specifico formato vettoriale di GRASS (formato nativo). E' comunque possibile importare e trasformare molti altri formati (ArcInfo-Coverages, CSV, DGN, SHAPE files, GIS ManagerL, MapInfo, MySQL, ODBC, OGDI, PostgreSQL/PostGIS, Sqlite/Spatialite, S57, SDTS, TIGER, UK .NTF,VRT). In alternativa, la geometria può anche essere salvata in un database PostGIS. Inoltre alcuni formati GIS, come ad esempio gli shapefile possono essere utilizzati direttamente senza la conversione di formato. In questo caso però si può lavorare in modalità read-only; nel caso invece di importazione bisogna far attenzione al fatto che gli shapefile, non presentando una struttura topologica, potrebbero non essere caricati correttamente se affetti da errori topologici.

Nel file della geometria ogni oggetto è caratterizzato da un numero di categoria, che può essere comune a più oggetti. Tutti gli attributi dei dati vettoriali sono salvati in table all'interno di un database e collegati alle caratteristiche geometriche mediante una DBMI (DataBase Management Interface). Attualmente sono gestibili in GRASS i seguenti DBMS (Database Management Systems): DBF (DataBase File), PostgreSQL, MySQL, ODBC, mediante i driver denominati dbf, pg e ogr. Il formato DBF il cui driver, dbf, è sempre presente, rappresenta il driver di default (dalla versione 7 sarà Sqlite).

Una table è costituita da un insieme di colonne, ciascuna delle quali rappresenta un attributo, e da tante righe quanti sono gli oggetti presenti nella carta (o i gruppi di oggetti che nel file della geometria hanno lo stesso valore di categoria).

La connessione fra ciascun oggetto vettoriale (punto, linea, poligono) nel file della geometria ed i suoi attributi nella table è effettuato tramite il numero di categoria.

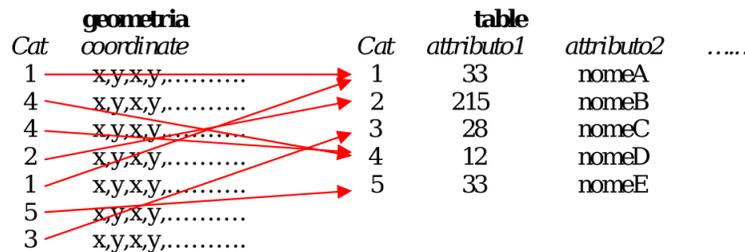


Fig. 11 geometria e attributi dati vettoriali in grass

In molte circostanze, quando si crea una carta vettoriale viene automaticamente creata la table degli attributi a cui viene assegnato lo stesso nome della carta. Dal momento che il linguaggio di interrogazione delle table, SQL, non consente l'utilizzo del punto all'interno del nome di una table, anche il nome della carta vettoriale è soggetto alla stessa restrizione.

I formati vettoriale e raster sono salvati in directory diverse e sono gestiti mediante comandi diversi, per cui è possibile assegnare lo stesso nome ad una carta vettoriale e ad una raster senza problemi di conflittualità.

4.2.3 LA REGIONE DI LAVORO

Un concetto basilare in GRASS è la regione di lavoro. La regione di lavoro (definita region in GRASS) è l'area geografica di forma rettangolare, definita dalle coordinate dei bordi del rettangolo, all'interno della quale hanno effetto le operazioni eseguite da GRASS. Una regione deve essere definita in concomitanza con la creazione di una Location e viene assunta come regione di default. Tale regione non può essere modificata ed è sempre disponibile. E' tuttavia possibile definire altre regioni durante una sessione di lavoro in GRASS, che possono essere salvate e richiamate in qualunque momento.

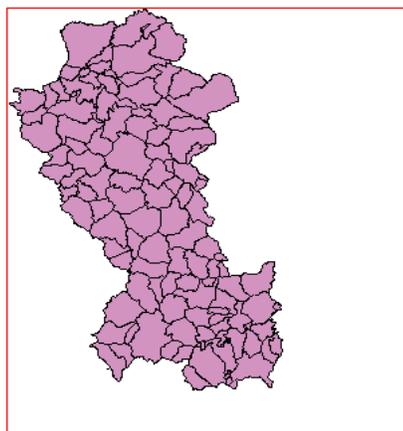


Fig. 12 esempio di visualizzazione in QGIS della regione (in rosso) definita in GRASS

4.3 QGIS

Il progetto QGIS (Quantum GIS) è più recente e nasce nel 2002. E' anche esso un Desktop GIS open source. Come GRASS, nasce per l'utilizzo sotto piattaforme UNIX (ovviamente Linux compresa) e oggi è comunque compatibile con altri sistemi operativi.

Quantum GIS consente il trattamento di dati geospaziali e supporta diversi tipi di formato di dato grazie alle librerie GDAL/OGR. Oltre alla gestione diretta degli shapefiles, QGIS gestisce direttamente i dati nativi in GRASS. E' dotato di una Interfaccia più semplice di GRASS ed è utilizzato tantissimo dagli utenti GRASS. E' così ben integrato che ha senso parlare del pacchetto GRASS/QGIS che non di entrambi i software singolarmente.

Qgis gestisce le Location, i Mapset, i raster, i vettori e le region. Punto fondamentale è la possibilità di richiamare i comandi GRASS per l'analisi in forma semplificata. La shell (la linea di comando) che è usata potentemente in GRASS è sempre presente ed ha esattamente le stesse potenzialità. Inoltre, è presente un tool con l'implementazione di diversi moduli di GRASS. Questi tools sono contraddistinti da una logica della semplificazione fornendo meno opzioni all'utente per evitare di sbagliare.

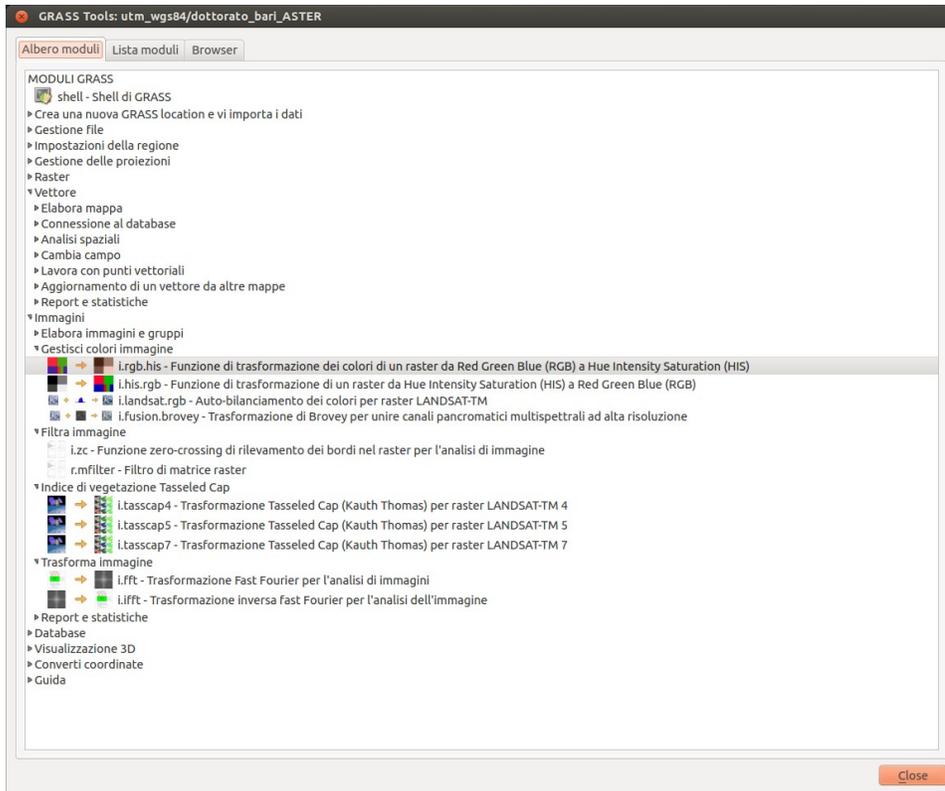


Fig. 13 GRASS tools richiamati da QGIS

In più QGIS permette di visualizzare tabelle con supporto geografico provenienti dal database relazionale PostgreSQL tramite il supporto di PostGIS (o di Spatialite), di riproiettare al volo i vettoriali e raster, di creare dei layout di stampa, di supportare i servizi WMS, WFS etc..

4.4 R

R è un software specializzato nell'analisi statistica dei dati ed è scaricabile gratuitamente da Internet sul sito di The R Project for Statistical Computing (<http://www.r-project.org>). E' un ambiente statistico costituito da una varietà di strumenti ed è orientato alla gestione, all'analisi dei dati e alla produzione di grafici. R può essere definito come un sistema di analisi statistica, che è sia un linguaggio che un software. Lo stesso R Development Core Team, parlando di R, preferisce definirlo come un ambiente integrato e coerente, piuttosto che come la somma di un insieme di strumenti poco flessibili. Risulta essere molto

potente con un'ampia possibilità di strumenti per calcoli su vettori, matrici ed altre operazioni complesse. Inoltre c'è la possibilità di usare un vero e proprio linguaggio di programmazione orientato ad oggetti che consente l'uso di strutture condizionali e cicliche, nonché di funzioni create dall'utente. E' un software multiplatforma per diverse architetture hardware e sistemi operativi: Unix, Linux, Windows, MacOS. Sul sito <http://www.r-project.org> è possibile scaricare, il programma base ed anche molti moduli aggiuntivi, tutorial, guide e manuali. Può essere definito come un sistema di analisi statistica costituito da una varietà di strumenti, orientato alla gestione, all'analisi dei dati e alla produzione di grafici. E' sia software che un linguaggio di programmazione. E' organizzato in package. Un package è fatto da un set di strumenti che svolgono determinate funzioni, oppure può essere solo un contenitore di dati o di documentazione. Al link <http://cran.at.r-project.org/> sono reperibili moltissimi packages per problemi specifici. Il cuore di R è rappresentato dal modulo base (che offre gli strumenti fondamentali per l'analisi statistica) e attorno a questo modulo "ruotano" una serie di altre librerie addizionali, alcune delle quali sono già comprese nel programma R al momento in cui lo si installa, mentre altre librerie ancora, in relazione alle esigenze e necessità, possono essere aggiunte e installate dall'utente dopo averle scaricate dal sito suddetto.

Allo sviluppo del software partecipano una pluralità di soggetti in diversi luoghi nel mondo e riescono a collaborare e cooperare grazie ad Internet. Per gli utenti esistono diverse forme per la ricerca di aiuto e lo possono fare attraverso i forum, le liste di discussione etc. Inoltre R è in grado di dialogare con diversi strumenti ; nel caso in esame è stato integrato all'interno del software GRASS GIS. Questa modalità consente di applicare i moduli di R e/o di GRASS lavorando in un unico Database. Quindi c'è la possibilità di avere molte funzioni per le analisi spaziali, analisi di telerilevamento e di (geo)statistica in un unico ambiente.

Uno dei pacchetti fondamentali in questo lavoro è `spgrass6` che permette di interfacciare i dati del DB di GRASS con i tool di R. L'ambiente di sviluppo di R è molto dinamico ed in continua evoluzione e frequentemente nuovi ulteriori packages sono realizzati e messi a disposizione dei ricercatori.

Anche R è GNU-Software e viene rilasciato con licenza GPL (General Public License) che, nella logica e nella filosofia del software opensource, permette a chiunque di accedere al codice sorgente, modificarlo, migliorarlo, integrarlo e mettere a disposizione della comunità scientifica.

4.5 OPEN SOURCE: GLI ASPETTI FONDAMENTALI

Un software “Open source” viene spesso confuso con un software “gratis”. E' necessario definire i concetti alla base della filosofia Open Source e spiegare le differenze che esistono tra una tecnologia gratuita ed una Open Source. Il software gratuito è strutturato in modo tale da poter far riferimento ad applicativi che, in termini legali, permettono solo l'uso gratuito dei programmi. Un software gratuito è utilizzabile senza dover comprare una licenza d'uso ma ha dei forti limiti, quali la non modificabilità del codice sorgente e la distribuzione dello stesso. La differenza sostanziale risiede nel fatto che il software Open Source può essere invece usato, analizzato, modificato senza restrizioni e può essere copiato e ridistribuito. Questo principio alla base della filosofia dell'Open Source è anche la forza dei vari movimenti che, grazie a queste libertà e al web, possono avere contributi utili ai miglioramenti del software da ogni capo del mondo.

Usando quindi la definizione Open Source si identifica principalmente l'accesso libero al software e al suo codice sorgente. Sinteticamente i passi storici fondamentali nello sviluppo del movimento Open Source indicano che nel 1983 Richard Stallman¹⁴ diede il primo forte impulso per la libera circolazione del software. Nel 1985 fu fondata la Free Software Foundation (FSF) proprio per diffondere la filosofia e il concetto di Free Software. Andando più nello specifico, gli aspetti principali da ricercare nel termine Open Source non sono solo legati all'accesso libero al codice sorgente di un software, ma anche ad altri requisiti che lo stesso software deve soddisfare. La distribuzione del software deve essere libera e la licenza non può limitare nessuno dal vendere o redistribuire il

¹⁴Richard Matthew Stallman è un programmatore, informatico e attivista statunitense. È uno dei principali esponenti del movimento del software libero. Nel settembre del 1983 diede avvio al progetto GNU con l'intento di creare un sistema operativo simile a Unix ma composto interamente da software libero: da ciò prese vita il movimento del software libero (fonte: Wikipedia)

software. Ogni software deve essere distribuito con il codice sorgente. Il codice sorgente, naturalmente, deve essere leggibile. Tuttavia in alcuni casi un programma può essere distribuito senza il proprio codice sorgente ma questo deve essere chiaramente esplicitato e, inoltre, deve essere indicato anche il modo per ottenere il codice sorgente. Difatti, per poter migliorare un prodotto è necessario disporre del codice, che può essere così modificato o migliorato.

La licenza deve essere svincolata da prodotti che si basano su particolari tecnologie o tipi di interfacce e non deve essere discriminante per nessuna persona. Qualsiasi derivazione che si possa ottenere, realizzando programmi derivati dal codice sorgente principale, deve avere la stessa tipologia di licenza. La licenza deve esplicitamente permettere la distribuzione del software prodotto con un codice sorgente modificato. Inoltre deve essere chiaro agli utenti chi è responsabile del software che un utente utilizza. In termini di licenze più aperte, si deve consentire l'uso del software in tutti i possibili settori anche se rivolti al mondo commerciale. Questo, anche se può sembrare strano, dà dei vantaggi alle aziende che decidono di usare prodotti Open Source. Le aziende possono riscontrare dei limiti nel software utilizzato ma, attraverso il codice aperto, possono “migliorare” il programma in questione portando un beneficio a tutta la comunità. La licenza non deve però porre limitazioni su altro software distribuito assieme al software licenziato. La licenza non deve richiedere che gli altri programmi che vengono distribuiti assieme siano software Open Source. I termini della licenza per le distribuzioni di software derivate da quella originale devono essere gli stessi.

Oltre alla distribuzione/diffusione del software, un altro concetto importante da considerare è quello delle “licenze d’uso”. Ad oggi esistono diverse tipologie di licenze che accompagnano i software Open Source e, a volte, presentano solo lievi differenze tra di loro.

Una tipologia di licenza molto famosa (GNU GPL - General Public License) obbliga a distribuire il software alle stesse condizioni della licenza del software originario. La GNU LGPL (Lesser General Public License) invece, consente l'uso del software all'interno di software proprietario, ma il codice free utilizzato deve rimanere libero.

Oltre alle due licenze citate ne esistono molte altre ed è sempre opportuno studiarle in maniera approfondita per non incorrere in usi inappropriati di uso o di distribuzione del software.

5 DALLE MISURAZIONI A DISTANZA ALLE INFORMAZIONI

Le immagini da satellite offrono significative capacità per poter trarre informazioni integrali e studiare il territorio, specialmente per quanto riguarda gli impatti dell'attività umana sul land use e sulla copertura della terra. Una delle principali problematiche associate all'uso di sistemi per l'osservazione della Terra, tuttavia, è collegata all'interpretazione quantitativa del segnale, interagente con gli oggetti remoti, in termini delle proprietà di questi oggetti.

5.1 IL GIS E IL REMOTE SENSING

Negli ultimi anni l'uso delle immagini satellitari sta conoscendo una diffusione sempre maggiore. Questo è dovuto sia alla possibilità d'uso dei dati satellitari in svariate applicazioni, sia ad una maggiore accessibilità economica dei dati stessi. Non è da trascurare però che, mentre fino a qualche anno fa le immagini satellitari erano disponibili al richiedente perlopiù in formato grezzo (quindi dominio di ricercatori e tecnici con competenze e strumenti specifici), oggi sono disponibili prodotti con diversi gradi di elaborazione. Altro aspetto importante sono le caratteristiche proprie del telerilevamento che consentono di ottenere immagini del territorio in formato digitale, di ottenere informazioni del territorio in diverse bande spettrali (multispettralità), di osservare la stessa zona della Terra in tempi diversi (multitemporalità), di esaminare ampie porzioni di territorio (vista sinottica) e di ottenere diverse risoluzioni spaziali a terra (risoluzione geometrica). Queste caratteristiche fanno sì che il telerilevamento possa rappresentare un valido aiuto per la gestione del territorio, per analizzare le variazioni dell'assetto dello stesso e per la pianificazione territoriale. Il dato satellitare rappresenta

un aiuto concreto per tutti coloro che hanno bisogno di dati territoriali aggiornati e reali; in particolare dovrebbero essere sensibili a tali possibilità gli “Uffici Urbanistici”, dato che, oltre ad analizzare le caratteristiche territoriali in fase di progettazione urbanistica, devono controllare le modificazioni territoriali ed effettuare la loro gestione in fase di attuazione di piano. La multitemporalità, la possibilità di disporre di immagini di archivio e l'utilizzo di immagini provenienti da remoto consentono di monitorare in modo costante le dinamiche evolutive del territorio.

Abusivismo, verifica del grado di attuazione degli strumenti urbanistici, dinamiche dell'uso del suolo, sono solo alcuni degli elementi che possono essere monitorati periodicamente. I risultati dello studio dei vari fenomeni territoriali possono essere posti sotto forma di mappe cartografiche di semplice ed immediata lettura anche integrabili in un sistema informativo geografico.

Lo studio in questione individua fra le varie possibilità alcune tipologie di satelliti e sensori più diffusi ponendo l'attenzione sui satelliti dotati di sensori passivi (più economici ed adeguati per le applicazioni urbanistiche rispetto ai sensori radar). In base alle esigenze del problema in esame, le possibili soluzioni da adottare sono basate su diverse piattaforme.

5.2 METODI DI ANALISI SPAZIALE

Alle modalità classiche del telerilevamento si intendono affiancare anche alcune analisi geostatistiche che permettono di avere maggiore informazione sul fenomeno. La geostatistica rappresenta una possibilità di lettura esauriente del territorio ed è stata applicata sia sui dati cartografici che sui dati satellitari.

Le tecniche di statistiche spaziali e i metodi di autocorrelazione vengono quindi utilizzati, mediante indicatori globali e locali, per una analisi più approfondita del sistema insediativo.

5.2.1 ANALISI SPAZIALE

Per analisi spaziale si intendono le operazioni effettuate su dati spaziali, per uno o più strati informativi, al fine di ottenere nuova informazione. Il formato raster (immagini satellitari), essendo organizzato su base matriciale, è facilmente gestibile e permette di usare le elaborazioni tipiche delle analisi spaziali. Le operazioni di overlay e map algebra sono semplici poiché avvengono cella per cella. Diversamente, il vettoriale ha una strutturazione molto più complessa che può rendere difficile la risoluzione di alcuni problemi di analisi spaziale. Una operazione di overlay fra poligoni nel modello vettoriale fornirà un nuovo poligono sicuramente diverso da quelli di partenza, mentre nel raster il valore delle celle di output sarà funzione del valore di quelle di input. Spesso però è più indicata la rappresentazione vettoriale rispetto a quella raster; basti pensare ad una cartografia di base con strade, edifici, fiumi o ad una cartografia catastale, che, per la loro schematicità e per i molti attributi legati agli elementi, si prestano sicuramente meglio per il formato vettoriale. In questi casi il formato raster, non potendo scendere al di sotto della risoluzione minima data dalla dimensione del pixel, non dà prestazioni ottimali. Il caso inverso invece è quello di una rappresentazione di un modello digitale del terreno (DTM) dove è più razionale pensare ad una rappresentazione raster. Come si evince la scelta del formato da utilizzare viene fatta caso per caso. Per i casi più complessi la scelta non è immediata e dipende anche da altri elementi. A volte le rappresentazioni vettoriali vengono preferite perché le griglie, essendo di formato regolare, possono perdere dettagli. Chiaramente, aumentando la risoluzione del raster, e quindi diminuendo la dimensione della cella elementare, la perdita di dettagli è sempre meno sensibile; il problema che potrebbe sorgere è legato alle dimensioni del file che aumentano e ciò potrebbe rendere più complicata la fase di elaborazione. Resta il fatto che nei casi di analisi spaziale, le operazioni di “map algebra” (ossia la costruzione di sequenze di elaborazioni effettuate mediante l’uso di operatori elementari) che sono applicabili anche a dati vettoriali, danno i risultati più rilevanti con il formato raster. Un esempio di utilizzo delle operazioni di map algebra per i dati vettoriali è l’unione di due mappe. Ogni manipolazione dei dati fornirà, a partire da un input, un dato di output. Nel

caso dei raster, se l'input è costituito da più grid, è necessario che le dimensioni spaziali, in termini di estensione e di risoluzione, siano le stesse.

Il valore della cella nel raster di output sarà determinato in base al valore della cella corrispondente del raster di input oppure, nel caso di più matrici di input, in base alle celle corrispondenti.

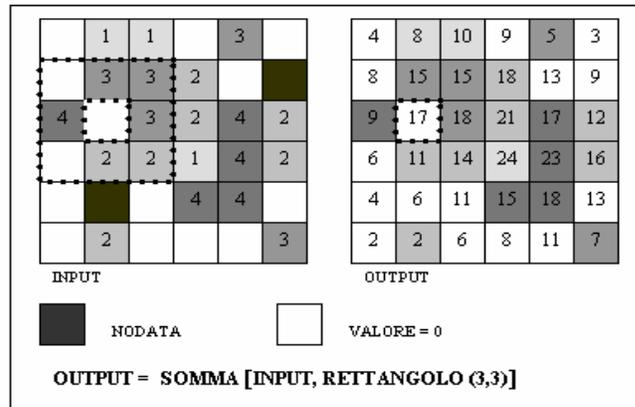


Fig. 14 Il valore in output del pixel è uguale alla somma dei valori dei pixels compresi nella matrice 3 x 3 che ha centro nel pixel stesso

Una condizione essenziale per le operazioni di map algebra è che le matrici abbiano stesse dimensioni per il dominio e per la taglia delle celle. In questo modo una semplice operazione di sovrapposizione di due matrici fornirà una matrice di output con le stesse dimensioni delle mappe di input.

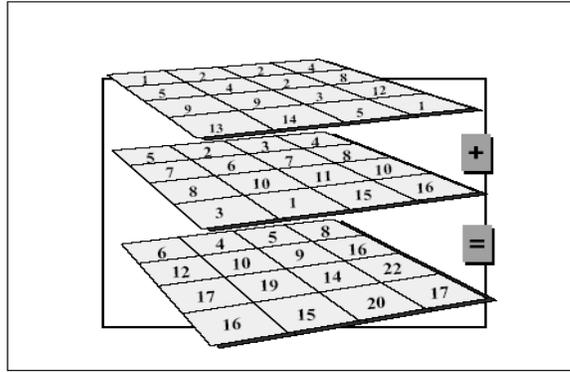


Fig. 15 Esempio di somma di strati informativi con raster di output con stesse dimensioni

In alcuni casi le matrici che contengono le informazioni potrebbero essere riclassificate per facilitare le operazioni. Se ad esempio le celle di una mappa contengono i dati sulle pendenze e l'interesse di studio è relativo solo alle aree con pendenza inferiore al 25%, i pixels potrebbero essere riclassificati assegnando a tutte le celle con valore maggiore del 25% il valore 'zero' e per le rimanenti il valore 'uno'.

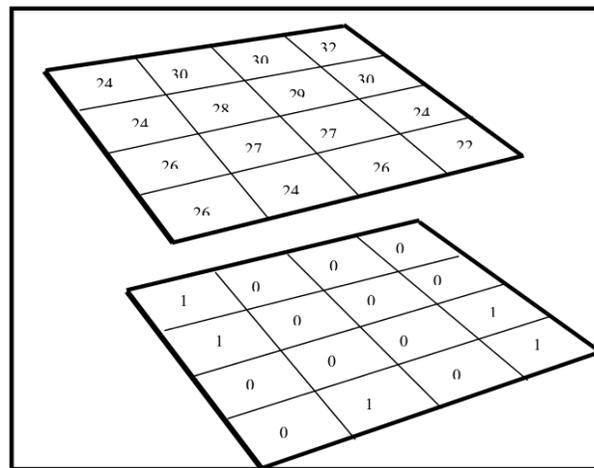


Fig. 16 Esempio di riclassificazione di una mappa

Un'operazione simile però, per essere realmente utile, deve rendere compatibile la mappa riclassificata con le altre di input per non incorrere nel problema di avere come risultato qualcosa di non significativo.

5.2.2 AUTOCORRELAZIONE SPAZIALE

Il concetto di autocorrelazione spaziale è basato sulla prima legge della geografia di Waldo Tobler (1990) "Everything is related to everything else, but nearest things are more related than distant things". L'autocorrelazione dà una stima della relazione spaziale esistente tra gli eventi considerando le proprietà degli eventi e le distanze tra gli stessi. Nel caso in cui un fenomeno non presenta autocorrelazione spaziale è plausibile pensare ad una assenza di correlazione tra gli eventi (il che significherebbe che la probabilità di avere eventi "relazionati spazialmente" è nulla). L'autocorrelazione è comunque determinabile fissando un raggio di ricerca (che definisce l'area entro la quale considerare due o più eventi eventualmente relazionati) e caratterizza ogni evento in una distribuzione di dati.

La distribuzione può avere tre tipi di autocorrelazione spaziale (O'Sullivan and Unwin, 2002):

- la variabile mostra autocorrelazione spaziale positiva (fig. 17.a) con eventi vicini e simili (clustered distribution);
- la variabile mostra autocorrelazione spaziale negativa (fig 17.b) con eventi che possono essere vicini ma diversi (uniform distribution);
- la variabile mostra autocorrelazione spaziale nulla (fig 17.c) dove non ci sono relazioni spaziali tra gli eventi né relativi alla posizione e né relativi alle proprietà.

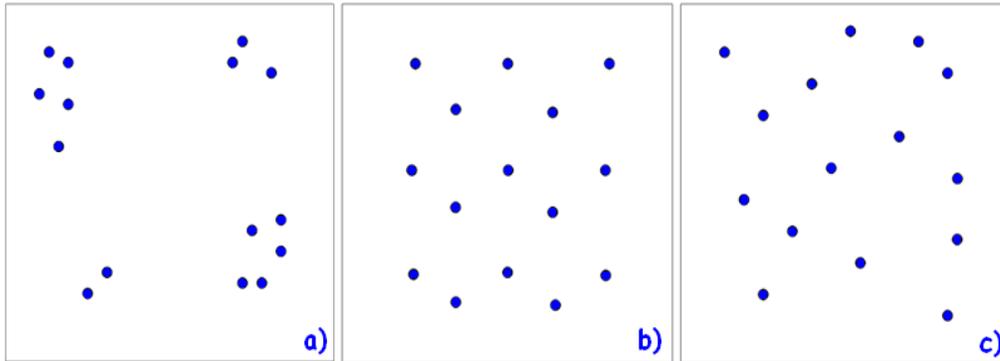


Fig. 17 Autocorrelazione spaziale

La presenza di autocorrelazione in una distribuzione spaziale è causata da due effetti (Gatrell et al, 1996.) L'effetto di primo ordine dipende dalla proprietà della regione di studio e misura come il valore atteso (media del valore quantitativo associato ad ogni evento spaziale) varia nello spazio con la seguente espressione:

$$\left\{ \frac{E(Y(ds))}{ds} \right\}$$

dove ds è il raggio di ricerca attorno all'evento s , $E()$ è la media attesa e $Y(ds)$ è il numero di eventi nell'intorno di ricerca.

L'effetto di secondo ordine esprime l'interazione locale fra eventi in un raggio di ricerca fissato. Questi effetti sono misurati con la variazione della covarianza espresse dal limite

$$\left\{ \frac{E(Y(ds_i)Y(ds_j))}{ds_i ds_j} \right\}$$

dove i simboli sono paragonabili al primo caso.

Come si capisce dalla definizione degli effetti di primo e secondo ordine, per lo studio dell'autocorrelazione spaziale è necessario conoscere:

- la natura quantitativa del dataset, chiamato anche intensità del processo spaziale, (Murgante et al., 2008), con l'obiettivo di capire se gli eventi sono simili o diversi.

- la natura geometrica del dataset. Ciò richiede la concettualizzazione dei rapporti geometrici, di solito fatto con l'uso di matrici: una matrice di distanza è definita per considerare a che distanza gli eventi si influenzano (distance band); una matrice di contiguità è utile per sapere se gli eventi si influenzano a vicenda; una matrice dei pesi spaziali esprime quanto è forte questa influenza.

Per quanto riguarda la matrice di distanza, un metodo molto usato per definire la distanza stessa è la distanza euclidea.

$$d_E(s_i, s_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}.$$

Per quanto riguarda la direzione i metodi sono chiamati tower contiguity, bishop contiguity e queen contiguity. Relativamente alla matrice dei pesi spaziali, per calcolare il peso w_{ij} , ci sono il metodo "Inverse Distance" e il "Fixed Distance Band". Nel primo caso, i pesi sono in relazione inversa alla distanza d_{ij}^z tra gli eventi:

$$w_{ij} = d_{ij}^z$$

dove z è comunemente posto uguale a 2.

Il secondo definisce una distanza critica oltre la quale due eventi non saranno mai adiacenti. Se le aree a cui appartengono i e j sono contigue, w_{ij} sarà uguale a 1, altrimenti w_{ij} sarà pari a 0.

Quindi per studiare l'autocorrelazione spaziale nel telerilevamento è importante definire quali sono gli eventi del territorio, l'intensità degli eventi e le relazioni spaziali. Lavorando su dati raster l'evento spaziale è rappresentato tramite pixel e di solito sono individuati considerando le coordinate geografiche del suo baricentro. Per quanto riguarda l'intensità dovrebbe essere scelta in considerazione della natura strettamente empirica del caso di studio. In questo lavoro l'intensità scelta è data in alcuni casi dal valore dell'indice BAI e in altri dall'indice NDVI.

La concettualizzazione dei rapporti geometrici nel caso del Remote Sensing è semplificata perché la distanza tra gli eventi viene misurata in pixel. La distanza di contiguità è chiamata lag distance. Applicando l'autocorrelazione spaziale otterremo in output un nuovo raster che contiene in ogni pixel un numero che esprime quanto sia correlato il pixel stesso con altri pixel.

5.3 GLI INDICATORI GLOBALI E LOCALI

Gli indicatori globali (come l'indicatore di Moran, 1948) misurano se e come il dataset è autocorrelato nella regione di studio.

L'indicatore di Moran è definito dalla seguente relazione :

$$I = \frac{N \sum \sum w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{(\sum \sum w_{ij}) \sum (X_i - \bar{X})^2}$$

dove N è il numero totale dei pixel, X_i e X_j sono le intensità nei punti i e j con ($i \neq j$), \bar{X} è il valore medio, w_{ij} è un elemento della matrice dei pesi.

I[-1; 1]; se I[-1; 0) c'è autocorrelazione negativa mentre se I(0; 1] è positiva. Teoricamente se I converge verso 0 non c'è autocorrelazione; in molti casi invece di 0 il valore usato per affermare che si tratta di autocorrelazione nulla è dato dalla seguente equazione:

$$E(I) = -\frac{1}{N-1}$$

dove N è il numero di eventi nell'intera distribuzione.

Gli indicatori di autocorrelazione locali permettono di individuare cluster di pixel misurando le similitudini delle features all'interno dell'area di ricerca. Uno degli indici maggiormente utilizzato è l'indice di Getis-Ord Local G_i (Getis and Ord, 1992; Illian et al., 2008):

La lettura del risultato di Getis non è immediata come avviene invece con Moran perché è necessario una classificazione a posteriori del raster che varia a seconda del caso di studio (dovrebbe essere fatta comparando Getis con i valori di intensità). In particolare, i valori alti dell'indice di Getis indicano correlazione positiva in corrispondenza di alti valori di intensità e lo stesso avviene per valori bassi di Getis e valori bassi di intensità.

I tools per l'analisi geostatistica esistono in diversi software ma in questo caso sono stati utilizzati i moduli presenti in GRASS “abbinato” a R.

5.4 IL REMOTE SENSING

Il Remote Sensing riguarda tutte le tecniche che consentono di ottenere informazioni su oggetti non vicini che sono ad una nota distanza dal sensore. Si può definire come una tecnica che permette di ottenere informazioni qualitative e quantitative di un oggetto, un'area o un fenomeno tramite l'analisi di dati acquisiti da un dispositivo a distanza (il sensore). Un trasduttore è un dispositivo che converte energia da una forma ad un'altra, producendo un segnale in uscita. Quando un trasduttore è in grado di ricevere e rispondere ad un segnale o ad una stimolazione con un segnale elettrico si definisce, appunto, sensore.

Il funzionamento, descritto schematicamente, rappresentato da una sorgente di energia elettromagnetica (il sole, la terra o il sensore stesso nel caso di sensori attivi). L'atmosfera influenza modificando, assorbendo e diffondendo la radiazione incidente e anche quella diretta verso il sensore. La radiazione incidente, a seconda delle caratteristiche della lunghezza d'onda e della superficie (che è comunque una sorgente ed emette radiazione elettromagnetica), viene assorbita e trasmessa in proporzioni variabili. L'energia riflessa o emessa viene rilevata dal sensore.

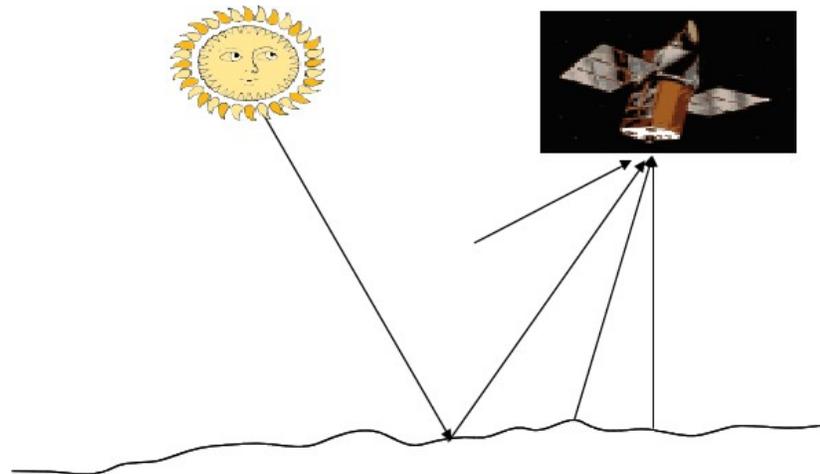


Fig. 18 Schematizzazione funzionamento del telerilevamento

Il Telerilevamento però non è solo acquisizione di informazione a distanza ma riguarda anche l'insieme dei metodi e delle tecniche per la successiva elaborazione e interpretazione. Lo scopo è quello di stabilire una corrispondenza tra la quantità e la qualità dell'energia riflessa o emessa e la natura o lo stato dei corpi o delle superfici dai quali l'energia proviene. Quindi con il telerilevamento, attraverso l'osservazione di campi di forza, di radiazione elettromagnetica o di energia acustica, per mezzo di macchine fotografiche, sistemi laser e radar, ricevitori a radio frequenza, sonar, dispositivi termici, magnetometri ed altri strumenti, si cerca di conoscere le caratteristiche degli oggetti investigate. In questo lavoro di tesi le applicazioni sono basate su informazioni provenienti dallo spettro delle onde elettromagnetiche: il principio fondamentale consiste nella capacità di ogni corpo di riflettere, assorbire e trasmettere una radiazione incidente in percentuali differenti, a seconda delle proprie qualità strutturali, chimiche, fisiche.

Ogni corpo, avente una temperatura superiore allo zero assoluto, è in grado, inoltre, di emettere radiazioni di ampiezza e lunghezza d'onda dipendenti dalle proprietà termiche dell'oggetto stesso.

Se l'oggetto osservato è a distanza “elevata” si parla di Remote Sensing (come nel caso di osservazioni effettuate dai satelliti geostazionari - 36000 Km), altrimenti, se avviene a distanza ravvicinata, si parla di proximal sensing.

Qualunque superficie esterna di un corpo, a temperatura superiore allo zero assoluto¹⁵ emette radiazioni elettromagnetiche proprie che dipendono dalla temperatura del corpo e dalla natura della superficie. La stessa superficie riflette, assorbe o si lascia attraversare dalle radiazioni elettromagnetiche provenienti dall'esterno; emissione, riflessione, assorbimento e trasmissione delle radiazioni sono fenomeni strettamente collegati fra loro.

I vari sensori di telerilevamento hanno bande (porzioni discrete dello spettro) che possono essere utilizzate in funzione dei corpi che si intende maggiormente studiare.

Lo spettro delle radiazioni elettromagnetiche che riguarda il campo del visibile va all'incirca da 0,4 a 0,7 μm .

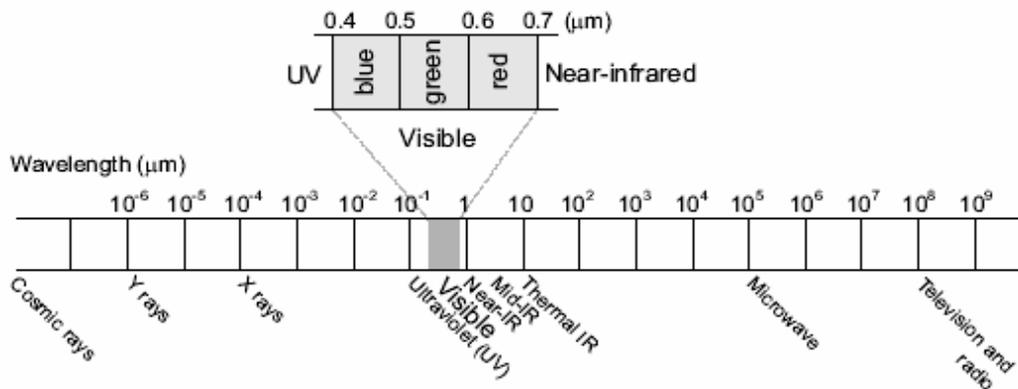


Fig. 19 Spettro elettromagnetico (in evidenza il visibile)

L'energia elettromagnetica relativa all'oggetto osservato fornisce informazioni utili soprattutto nelle bande del visibile, infrarosso, microonde; qualche esperienza viene

¹⁵Per zero assoluto si intende lo zero della scala Kelvin, pari a -273.14 ° C ($K = ° C + 273.14$) e corrisponde al punto in cui le molecole e gli atomi hanno la minore energia termica possibile.

condotta anche in banda ultravioletta, nonostante i limiti imposti dal comportamento dell'atmosfera in questa regione dello spettro elettromagnetico. Oltre alla risoluzione spettrale sono importanti anche altre caratteristiche degli strumenti di Remote Sensing; in sintesi sono da considerare:

- Risoluzione geometrica: dimensioni al suolo del pixel
- Risoluzione spettrale: intervallo di lunghezze d'onda a cui è sensibile lo strumento, il numero di finestre spettrali (bande) e la loro ampiezza
- Risoluzione radiometrica: la sensibilità del sensore intesa come minima energia in grado di stimolare il detector affinché produca un segnale elettrico rilevabile dall'apparecchiatura
- Risoluzione temporale: tempo di rivisitazione della stessa porzione di territorio

Dal punto di vista storico, la fotografia rappresenta una delle prime applicazioni di Remote Sensing; difatti la fotografia ha permesso di estendere le possibilità di percezione e di registrare in modo permanente le osservazioni. Tuttavia il Telerilevamento moderno ha mosso i primi passi importanti nel 1960 con la missione TIROS-1 1960 avendo notevole evoluzioni fino ad oggi.

Un sistema di telerilevamento prevede che ci sia una sorgente di energia elettromagnetica (il sole, un dispositivo di emissione di energia elettromagnetica, o l'ambiente stesso nel caso di energia emessa), un mezzo di trasmissione per tale energia (l'atmosfera terrestre), una superficie o target riflettenti o emittenti di energia , un sensore in grado di osservare la superficie terrestre e posto su piattaforma orbitante, o veicolo aereo, in grado di rilevare l'energia elettromagnetica riflessa e/o emessa dalla superficie terrestre e di organizzarla in forma di dati. Nel caso di RS attivo il sensore è sia ricevitore che emettitore di energia, ovvero svolge il ruolo della sorgente. Ovviamente è necessario anche un sistema di telecomunicazione per controllare la piattaforma e gestire i dati acquisiti dal sensore e un sistema di elaborazione capace di trasformare un segnale

numerico in un'immagine e, successivamente, di estrarre automaticamente e/o facilitare l'estrazione delle informazioni utili.

I sensori più diffusi nel Remote Sensing per studi territoriali sono sensori multispettrali (Landsat, Spot, Quikbird, Aster, ecc.). Sono sensori che hanno basse risoluzioni spettrali e quindi hanno bande di notevole ampiezza; questo non permette una buona discriminazione delle caratteristiche spettrali. Invece i sensori iperspettrali

(Mivis, Aviris, HypMap, ecc.) hanno una risoluzione spettrale "migliore" e consentono di ottenere una discreta discriminazione di alcune bande di assorbimento. Di contro i sensori iperspettrali non hanno una larga copertura della superficie terrestre ed è anche questo uno dei motivi che induce a preferire per diversi applicazioni territoriali i sensori multispettrali.

Da pochi anni sono disponibili dati telerilevati con una risoluzione spaziale elevata, che consentono di aumentare notevolmente la scala di indagine, con prestazioni, in termini di accuratezza, paragonabili a quelle ottenute con le tradizionali tecniche aerofotogrammetriche. L'aumento della risoluzione spaziale aumenta il dettaglio della forma dell'oggetto ma implica un aumento dei parametri necessari per descrivere una classe. Normalmente ad una elevata risoluzione spaziale, con le attuali tecnologie per il rilievo da satellite, corrisponde una ridotta risoluzione spettrale, che impedisce un descrizione dettagliata di una superficie basandosi sulle misure di energia riflessa dalla stessa. Inoltre i dati satellitari ad alta risoluzione spaziale difficilmente sono gratuiti e per i casi di studio affrontati, che riguardano aree a scala vasta, sono stati considerati dati con una risoluzione spettrale più ampia (a discapito della risoluzione spaziale).

5.5 I DATI TELERILEVATI

I dati telerilevati sono richiesti sempre di più negli ultimi anni e devono essere quindi gestiti, aggiornati e resi fruibili anche in postazioni remote. I software GIS oramai gestiscono bene i vari formati di immagini satellitari. Il remote sensing insieme ad altre discipline quali la geofisica, la fotogrammetria, la topografia, la cartografia, GIS

costituiscono un insieme di tecnologie che concorrono a rilevare e gestire le informazioni e a studiare i processi ambientali. Osservando un'immagine da satellite in RGB, la crescita di una città è caratterizzata dal passaggio dai colori della vegetazione naturale ai colori generalmente più chiari e luminosi dovuti all'alta riflessione delle costruzioni e dei terreni e suoli da cui la vegetazione è stata rimossa. Il fenomeno dell'espansione urbana può essere analizzato a varie scale a seconda del contesto insediativo da esaminare. Ovviamente, trattandosi di dinamiche non improvvise, necessitano immagini della stessa area in periodi diversi, ma la risoluzione temporale può anche non essere elevata. In ogni caso, le aree urbane possono essere individuate indagando le risposte spettrali delle stesse sia nella banda del visibile che in quella dell'infrarosso. Come si evince anche dalla figura sottostante, le costruzioni presentano dei valori più alti nell'infrarosso rispetto al visibile.

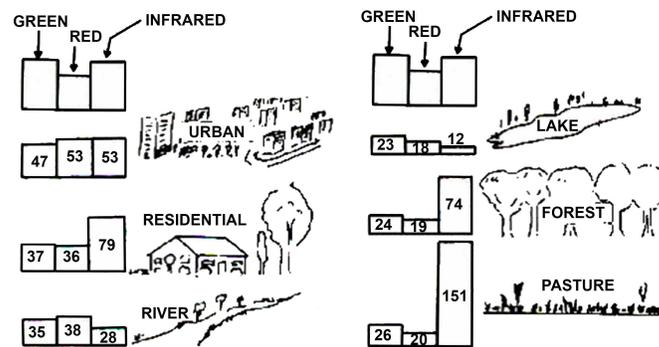


Fig. 20 Intensità del segnale nel visibile ed infrarosso

Per monitorare l'espansione urbana di grandi territori, ad esempio di un'area metropolitana, la soluzione Landsat è sicuramente più appropriata in quanto non necessita una elevata risoluzione geometrica e consente in un'unica immagine di esaminare una porzione d'area vasta.

I dati sui quali si è basato lo studio sono provenienti dalle missioni LANDSAT e ASTER.

5.5.1 LANDSAT

Il programma LandSat è il più longevo programma di Osservazione della Terra ed ha

avuto inizio nel 1972. Il primo satellite della missione Landsat, denominato LandSat-1, aveva a bordo il sensore multispettrale MSS (Multi-Spectral Scanner System). Dopo dieci anni questo sensore è stato sostituito con il Thematic Mapper (TM). Successivamente, nell'anno 1999 è stato lanciato in orbita il LandSat-7, che ha a bordo un sensore ETM plus.

La serie completa dei satelliti Landsat è costituita da sette satelliti sincroni¹⁶ con il sole:

- Landsat 1, che è stato lanciato a luglio 1972 ed ha funzionato fino a gennaio 1978
- Landsat 2, che è stato lanciato a gennaio 1975 ed ha funzionato fino a febbraio 1982
- Landsat 3, che è stato lanciato a marzo 1978 ed ha funzionato fino a ottobre 1982
- Landsat 4, che è stato lanciato a marzo 1982 ed ha funzionato fino a ottobre 1995
- Landsat 5, che è stato lanciato a marzo 1984 ed ancora in funzione
- Landsat 6, che è stato lanciato a ottobre 1993 e perso in lancio
- Landsat 7, che è stato lanciato ad aprile 1999 ed ancora in funzione
- Landsat 8, che è stato lanciato a febbraio 2013

Quindi i satelliti attualmente funzionanti sono solo il LandSat-5 e LandSat-7 e il nuovissimo Landsat 8.

Le prime tre missioni Landsat portavano due sensori, il più importante dei quali era il Multispectral Scanner (MSS) con quattro bande (la 4 nel verde, la 5 nel rosso, la 6 e la 7

¹⁶Un'orbita sole-sincrona è un'orbita che consente di osservare un oggetto sulla terra più volte sempre alla stessa ora solare locale. In questo modo l'illuminazione solare sulla superficie terrestre risulta essere la stessa per ogni rivoluzione, avendo delle condizioni di luce molto simili ogni volta. L'orbita eliosincrona ha inclinazioni di 95-100 gradi sul piano equatoriale, quota variante fra 600 e 800 km e periodo orbitale di 90-100 minuti.

nell'infrarosso vicino), una risoluzione spaziale di circa 80 m e uno swath di 185 km. A partire dalla missione 3 venne aggiunta una banda nell'infrarosso termico, con risoluzione spaziale minore (lato dei pixel di circa 240 m).

Il secondo sensore su Landsat 1,2 e 3 era il Return Beam Vidicom. Per landsat 1 e 2 il Return Beam Vidicom aveva tre bande (la 1 nel blu, la 2 nel rosso e la 3 nell'infrarosso) con la risoluzione spaziale di 80 m. Sul Landsat 3 invece erano alloggiati due Return Beam Vidicom identici e affiancati, ciascuno con un'unica banda pancromatica. La risoluzione spaziale nel pancromatico era di 40 m e ogni sensore aveva uno swath di 98 km. : i due, affiancati con una piccola sovrapposizione, fornivano dunque uno swath di 185 km. In ordine crescente rispetto alle bande 1, 2 e 3 del Return Beam Vidicom le bande MSS furono chiamate 4, 5, 6, 7 (e 8) nelle prime tre missioni Landsat. A partire da Landsat 4 il Return Beam Vidicom venne sostituito dal Thematic Mapper (TM). Nella missione del Landsat 6 (perso in lancio) si passò all'Enhanced Thematic Mapper (ETM) e infine, nel Landsat 7, all' ETM +.

Nelle missioni più recenti le bande MSS sono state rinominate da 4, 5, 6, 7 a 1, 2, 3 e 4 rispettivamente.

Le informazioni rilevate dagli strumenti di bordo e codificate in sequenze di cifre binarie da un convertitore analogico-digitale vengono poi trasmesse a terra e ricevute da una stazione al suolo in contatto radio diretto in linea d'aria con il satellite.

Le informazioni relative alle zone non coperte dalle stazioni vengono registrate su nastro a bordo del satellite e trasmesse alle stazioni riceventi all'atto del passaggio del satellite nella loro area di ricezione. Questo per ciò che concerne i primi tre satelliti del programma. Il Landsat 4 e 5 grazie alla loro più sofisticata strumentazione di rilevamento dispongono di un sistema migliore anche per la trasmissione a terra dei dati; usufruiscono di un satellite appoggio posto su di un'orbita alta e geosincrona cui trasmettono i dati rilevati.

Satellite	anno di lancio	sensore	nome banda	range Wave length(micrometri)	risoluzione spaziale(metri)
LANDSAT 7	1999	ETM +	1	0,45 - 0,515	30
			2	0,525 - 0,605	30
			3	0,63 - 0,69	30
			4	0,75 - 0,90	30
			5	1,55 - 1,75	30
			6	10,4 - 12,5	60
			7	2,09 - 2,35	30
			8	0,52 - 0,9	15

Tab. 4 Caratteristiche dato LANDSAT ETM+

L'altezza del satellite appoggio (36.000 Km) è tale che esso può ritrasmettere direttamente i dati a tutte le stazioni di un intero emisfero.

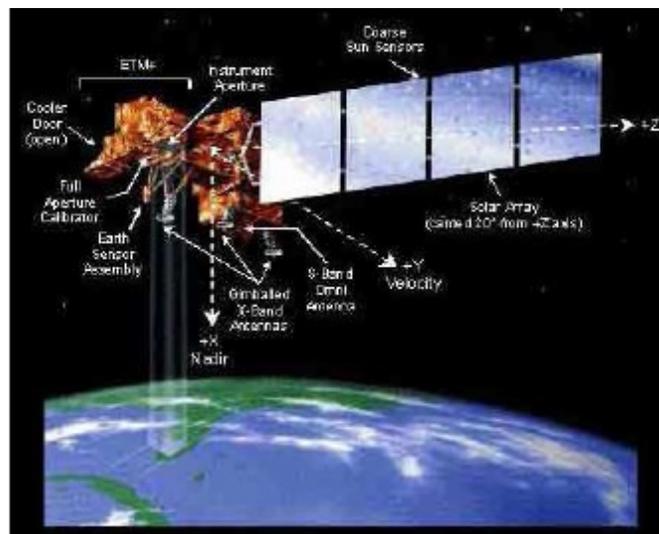


Fig. 21 Il satellite Landsat (fonte: NPA Group)

Il dato Landsat di riferimento per il lavoro di tesi è il Landsat 7 ETM +: Landsat 7 ETM+ (media risoluzione, scale fino a 1:30'000), orbita quasi polare eliosincrona, 7 bande multispettrali (30 m di risoluzione a terra; per la banda 6 è a 60m) ed una pancromatica (15 m), con tempi di ri-passaggio di 16 giorni con uno swath di 185 Km. Utile per la discriminazione delle informazioni territoriali (multispettralità) e per l'aggiornabilità di tali informazioni (multitemporalità). Le bande 1, 2, 3, 4, 5 e 7 sono sensibili all'energia

proveniente dal sole riflessa dalla superficie della Terra. Ogni banda è sensibile ad una parte diversa dell'energia solare riflessa. La banda 6 è nel termico (10,40 - 12,50 μm) ed è diversa da tutte le altre in quanto essa non registra l'energia riflessa ma piuttosto la temperatura della superficie della Terra. Oltre a queste bande, il sensore ETM+ ha un'ottava banda, detta banda pancromatica (0,50 - 0,90 μm) sensibile all'energia della luce riflessa in un vasto intervallo di lunghezze d'onda che comprende il blu, il verde, il rosso e l'infrarosso vicino.

Da ora in poi la missione Landsat 8 porterà un notevole contributo per lo studio del territorio e presenta caratteristiche interessanti. I nuovi sensori presenti sono OLI (Operational Land Imager) e TIRS (Thermal Infrared Sensor), che garantiranno prestazioni e qualità di ripresa superiori al precedente ETM+. Le bande passeranno da 8 a 11. In particolare sono state aggiunte due bande ottimizzate per lo studio dei cirri (1360/1380 nm) e dell'aerosol (430-450 nm) e il range nell'infrarosso termico è stato suddiviso in due bande, contro l'unica grande banda dell'ETM+

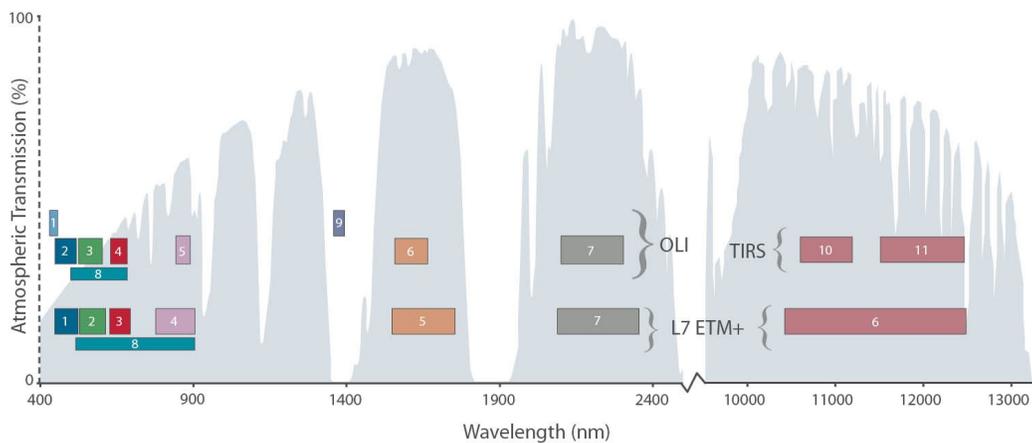


Fig. 22 Confronto tra le bande dei sensori ETM+ e OLI+TIRS (fonte USGS)

Anche il range spettrale del canale pancromatico (banda 8) è ampliato e continuerà ad acquisire con una risoluzione spaziale di 15m. Le immagini elaborate dai dati Landsat

saranno distribuite in formato Geotiff a 16 bit, georiferite rispetto al sistema di riferimento WGS84, con proiezione UTM, ortorettificate e corrette tramite un processamento Level 1T – Terrain Correction (ovvero sono già corrette radiometricamente e geometricamente, ed inoltre sono corretti/minimizzati gli errori di parallasse dovuti al rilievo del terreno). Per il sensore OLI viene garantita un'accuratezza CE90 di 12 metri (la reale posizione geografica di un elemento si trova, al 90% di probabilità, entro un un cerchio di 12 metri di diametro rispetto alla sua posizione nell'immagine), e di 41 m per il TIRS. Ogni 8 giorni il Landsat 8 ci offrirà una copertura completa della Terra, e le immagini ottenute dal sensore OLI potranno essere visualizzate e scaricate liberamente tramite il LandsatLook Viewer dell'USGS. Sarà possibile scaricare sia l'immagine visualizzata nel viewer, come JPEG, PNG o TIFF georiferita, oppure eseguire un "bulk download", ovvero scaricare i dati originali della scena richiesta, più l'immagine in colori naturali e nel termico.

5.5.2 ASTER

Il dato satellitare multitemporale a media risoluzione spaziale presenta le giuste caratteristiche per la valutazione di fenomeni come la dispersione insediativa. I dati utilizzati per questo caso di studio sono immagini acquisite dal sensore Aster (Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer), su piattaforma TERRA-EOS (<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>) che ha 14 bande, con una risoluzione spaziale che arriva fino a 15 metri. ASTER é uno strumento di acquisizione di immagini a bordo del satellite TERRA che ha avuto inizio nell'anno 2000 e rappresenta il primo sensore multispettrale per scopi civili. Il sensore ASTER è uno dei principali sensori del satellite TERRA in orbita a 705 Km di quota, all'interno del quale sono presenti quattro strumenti CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System); MISR (Multi-Angle Imaging Spectroradiometer); MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer); MOPITT (Measurements Of Pollution In The Troposphere).

Satellite	year of launch	sensor	band	range Wave length(micrometers)	spatial resolution(meters)
TERRA	1999	ASTER	GREEN	0,52 - 0,60	15
			RED	0,63 - 0,69	15
			N-IR	0,76 - 0,86	15
			N-IR	0,76 - 0,86	15
			4	1,60 - 1,70	30
			5	2,145 - 2,185	30
			6	2,185 - 2,225	30
			7	2,235 - 2,285	30
			8	2,295 - 2,365	30
			9	2,36 - 2,43	30
			10	8,125 - 8,475	90
			11	8,475 - 8,825	90
			12	8,925 - 9,275	90
			13	10,25 - 10,95	90
14	10,95 - 11,65	90			

Tab. 5 Caratteristiche dato ASTER

Il sensore ottico ASTER è costituito da tre sottosistemi separati (VNIR, SWIR, TIR). Il sistema fornisce immagini in 14 canali spettrali: 3 nel visibile ed infrarosso vicino (VNIR), con risoluzione spaziale di 15 m, 6 nell'infrarosso (SWIR) con risoluzione spaziale di 30 m e 5 nell'infrarosso termico (TIR) con risoluzione spaziale di 90 m. La combinazione dell'ampia copertura spettrale e l'alta risoluzione spaziale dei dati ASTER permettono di discriminare le differenti "coperture" superficiali e, pertanto, sono ideali per condurre studi territoriali all'area vasta.

A partire dall'aprile del 2008 lo SWIR non è più funzionante e questo limita parecchio le potenzialità del dato (VNIR e TIR continuano ad acquisire correttamente). TERRA è stato lanciato nel dicembre 1999 nel quadro di un progetto della NASA per l'osservazione della Terra e fa parte dell'Earth Observing System (EOS); l'EOS è un programma di satelliti della NASA che ha lo scopo di investigare, analizzare la superficie terrestre, analisi della temperatura, riflettanza ed estrazione del rilievo. L'Earth Observing System ha avviato uno studio della Terra a livello internazionale: ha creato una serie di satelliti speciali progettati per analizzare la complessità del mutamento globale; ha realizzato una rete di calcolatori avanzati per elaborare, immagazzinare, distribuire i dati (EOSDIS, EOS Data and Information System).

Il satellite TERRA, ha la traiettoria da polo a polo e incontra l'equatore alle 10:30 (ora locale) del mattino quando la copertura delle nuvole è minima e la vista del suolo è poco ostruita. La durata dell'intero ciclo di rotazione del satellite è di sedici giorni. Dato che l'orbita del satellite è quasi perpendicolare al verso di rotazione della Terra, gli swaths ripresi possono essere uniti per formare delle immagini intere. Inizialmente la durata prevista per la missione TERRA era di sei anni, ma con il lancio di altri satelliti verrà prolungata per altri 15 anni. Come evidenziato nella tabella relativa alle caratteristiche del sensore, ASTER è il sensore con risoluzione geometrica maggiore tra quelli presenti sulla piattaforma TERRA e l'area ricoperta dai pixel varia da 15 a 90 mq. Per tale caratteristica viene considerato lo "zoom" del satellite, in grado di fornire immagini di dettaglio in quattordici differenti bande dello spettro elettromagnetico, comprendenti il campo visibile, l'infrarosso vicino-medio e il termico. Rispetto al dato Landsat le informazioni nella banda del termico sono maggiori.

Oltre ad ASTER anche il sensore MODIS è a bordo del satellite TERRA. Le informazioni rilevate dai sensori avvengono sia di giorno che di notte. Un secondo sensore MODIS è stato installato sul satellite AQUA, lanciato nel 2002. ASTER presenta una risoluzione spaziale migliore nell'infrarosso (90m) rispetto a quella del MODIS (1 km) con un tempo di rivisitazione di 16 giorni, e le scene non sono collezionate ad ogni passaggio. Al contrario, i valori di temperatura superficiale (Land Surface Temperature, LST) registrati dal MODIS, sia dalla piattaforma Terra che Aqua sono accessibili quattro volte al giorno di una qualsiasi area (due durante il giorno e due durante la notte, copertura nuvolosa permettendo).

Per il presente lavoro però la scelta è ricaduta sul sensore ASTER che insieme al Landsat consente di poter meglio studiare e analizzare il fenomeno della dispersione insediativa, del consumo di suolo etc.

A tal proposito di seguito si può osservare una tabella comparativa tra i due sensori.

Satellite	anno di lancio	sensore	nome banda	range Wave length(micrometri)	risoluzione spaziale(metri)
LANDSAT 7	1999	ETM +	1	0,45 - 0,515	30
			2	0,525 - 0,605	30
			3	0,63 - 0,69	30
			4	0,75 - 0,90	30
			5	1,55 - 1,75	30
			6	10,4 - 12,5	60
			7	2,09 - 2,35	30
			8	0,52 - 0,9	15
TERRA	1999	ASTER	GREEN	0,52 - 0,60	15
			RED	0,63 - 0,69	15
			N-IR	0,76 - 0,86	15
			N-IR	0,76 - 0,86	15
			4	1,60 - 1,70	30
			5	2,145 - 2,185	30
			6	2,185 - 2,225	30
			7	2,235 - 2,285	30
			8	2,295 - 2,365	30
			9	2,36 - 2,43	30
			10	8,125 - 8,475	90
			11	8,475 - 8,825	90
			12	8,925 - 9,275	90
			13	10,25 - 10,95	90
14	10,95 - 11,65	90			

Tab. 6 Quadro riassuntivo delle caratteristiche dei dati TLR.

Per poter ottenere i dati landsat o aster e fare il download è possibile collegarsi al sito <http://glovis.usgs.gov/> selezionare la collezione "Landsat Archive" (ad esempio), il tipo di satellite/sensore (Landsat 1...7 indica il satellite; MSS, TM, ETM+ sono tre diversi tipi di sensore; SLC-off indica le immagini "difettose") e cliccare sulla mappa nel punto di interesse. Da poco è possibile utilizzare anche un nuovo sito <http://edcsns17.cr.usgs.gov/NewEarthExplorer/> che permette facilmente di individuare nell'archivio le immagini relative ad una determinata area selezionabile tramite ricerca geografica. Effettuando il download dell'immagine il dato viene scomposto ottenendo un raster per ogni banda (le immagini sono in formato geotiff,geocodificate in proiezione UTM con ricampionamento bicubic).

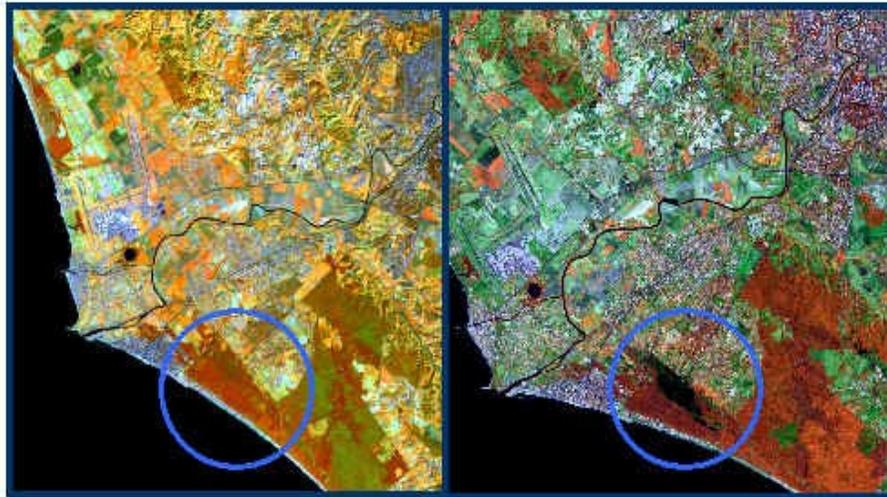


Fig. 23 Immagini (RGB 453) acquisite dal satellite Landsat 7 ETM+ su una porzione di Roma. Il confronto tra le due immagini, riprese in periodi differenti (a sinistra ripresa di febbraio, a destra ripresa di agosto), evidenzia la porzione di pineta (macchia scura sull'immagine a destra) incendiata a giugno 2000. Immagini fornite dalla EURIMAGE sede di Roma, copyright ESA.
www.eurimage.com

5.6 TECNICHE DI TRASFORMAZIONE DELLE IMMAGINI TELERILEVATE

Le trasformazioni di immagini sono operazioni che modificano l'espressione del contenuto informativo delle immagini stesse. Le immagini che hanno subito una trasformazione generalmente contengono la stessa informazione che avevano originariamente, resa però in una forma differente.

In particolare, le immagini trasformate tenderanno a mettere in evidenza alcune caratteristiche del loro contenuto informativo.

Le classi di trasformazioni possono essere classificate in:

- operazioni di soglia;
- operazioni aritmetiche;
- trasformazioni a base empirica;

- analisi a componenti principali;
- trasformazione IHS;
- filtri digitali
- rappresentazioni dei dati.

5.6.1 OPERAZIONI DI SOGLIA

Una delle operazioni più semplici che si può effettuare su un'immagine è la cosiddetta sogliatura: tutti i pixel che hanno valori inferiori ad un certo limite sono posti a zero, tutti gli altri sono posti pari al massimo. Di solito le zone così evidenziate si memorizzano a parte per poter specializzare le operazioni da svolgere.

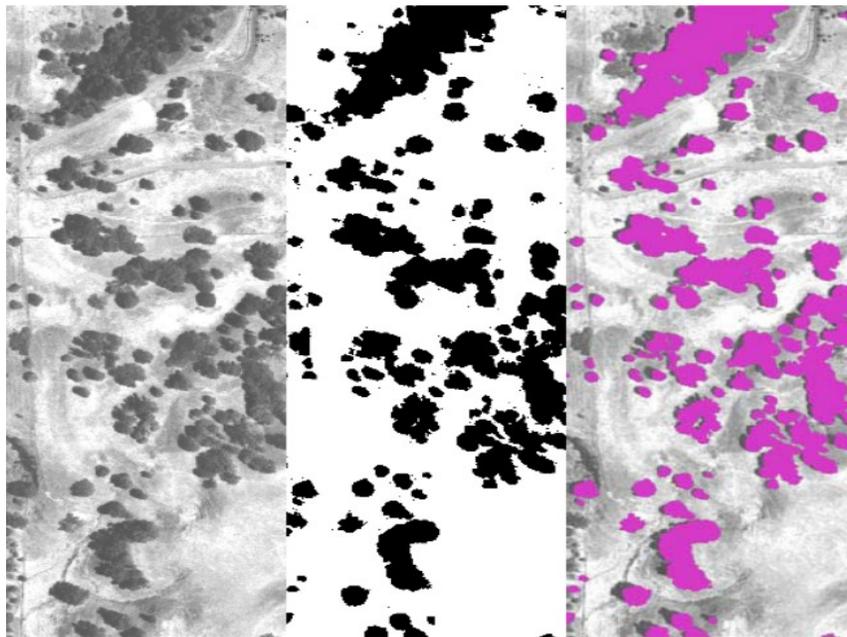


Fig. 24 Esempio di applicazione della soglia

5.6.2 OPERAZIONI ARITMETICHE

Tale tecnica consiste nell'applicare operazioni aritmetiche ai valori dei pixel appartenenti ad una o più immagini. A tal fine, considereremo le seguenti operazioni:

- sottrazione;
- somma;
- moltiplicazione;
- divisione.

Naturalmente si possono comporre operazioni più complesse combinando gli operatori sopra elencati. Salvo quando si tratta di operazioni che implicitamente riguardano una sola immagine (ad esempio moltiplicazione dei DN per una costante), le operazioni aritmetiche coinvolgono più immagini. Naturalmente, in quest'ultimo caso, le operazioni aritmetiche hanno senso solamente se sono effettuate tra i DN di pixel in posizioni corrispondenti sulla superficie terrestre. Perciò in genere si opera su immagini coregistrate in maniera accurata.

5.6.2.1 SOMMA DI IMMAGINI

$$Fr(x, y) = F1(x, y) + F2(x, y)$$

La somma di immagini nella maggior parte dei casi è solo apparentemente una somma, in quanto spesso i DN dell'immagine risultante sono normalizzati rispetto alla stessa gamma di valori delle immagini addendi. Ad esempio:

$$Fr(x, y) = (F1(x, y) + F2(x, y)) / 2$$

In termini pratici, la somma di immagini corrisponde il più delle volte ad una operazione di media. In quanto tale, può essere utilizzata per ridurre il rumore. Le più comuni cause di rumore nelle immagini causano variazioni casuali in entrambi i versi rispetto al valore "vero". Quindi sommando insieme diverse immagini rilevate sullo stesso scenario, le variazioni rispetto al valore vero tendono statisticamente ad annullarsi.

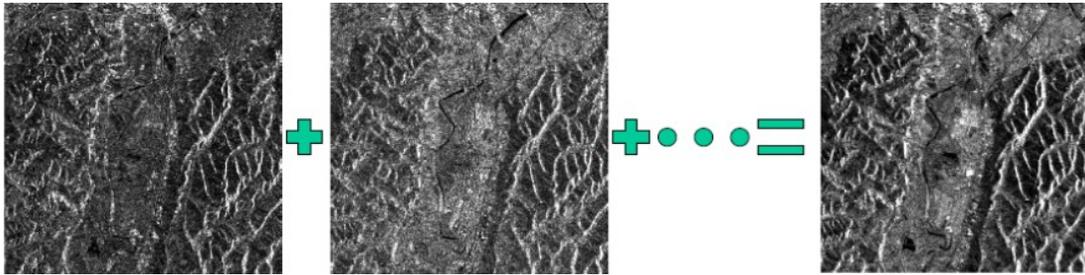


Fig. 25 Riduzione del rumore

5.6.2.2 DIFFERENZA DI IMMAGINI

$$Fr(x, y) = F1(x, y) - F2(x, y) \text{ oppure } Fr(x, y) = F1(x, y) - F2(x, y)$$

La differenza si effettua solitamente su immagini relative a date diverse al fine di rilevare i cambiamenti che sono avvenuti in un certo intervallo temporale. L'immagine risultante si visualizza generalmente in pseudocolori in modo da poter discriminare i pixel con valori intorno allo zero (assenza di cambiamento o cambiamento minimo) dai pixel con valori significativamente diversi dallo zero (cambiamento significativo). La differenza di immagini è uno dei metodi elementari per effettuare la rilevazione di cambiamento (change detection).



Fig. 26 Change detection

5.6.2.3 MOLTIPLICAZIONE DI IMMAGINI

La moltiplicazione tra immagini è raramente effettuata in pratica. Più spesso si moltiplica per una costante (di solito 0 o 1) ognuno dei pixel.

$$Fr(x, y) = c \cdot F1(x, y)$$

Lo scopo di questa moltiplicazione è di mascherare una parte dell'immagine che non è d'interesse: i pixel moltiplicati per uno conservano il proprio valore, mentre quelli moltiplicati per zero diventano a loro volta zero. Il risultato è un'immagine che coincide con l'originale solo dove il moltiplicatore vale 1, mentre è nera altrove.



Fig. 27 Esempio: immagine ERS-2 di Roma, mascherata per includere la sola area edificata.

5.6.2.4 DIVISIONE DI IMMAGINI

A differenza della moltiplicazione, la divisione tra immagini è largamente utilizzata, principalmente per due motivi:

- alcune caratteristiche significative della curva di riflettanza sono contenute nei rapporti tra i valori di riflettanza, anziché sui valori assoluti;
- gli effetti della variazione indesiderata dell'illuminazione (dovuti ad esempio alle differenti pendenze del terreno) possono essere corretti utilizzando il rapporto tra valori rilevati.

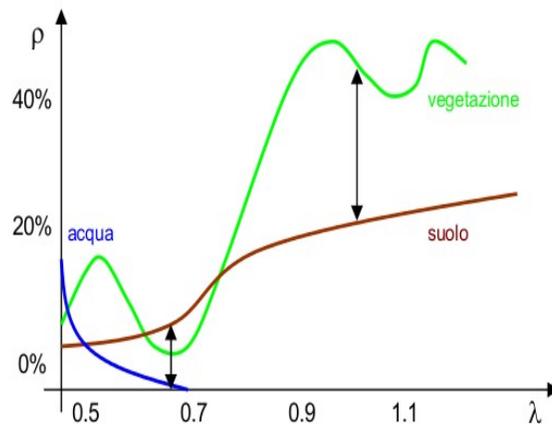


Fig. 28 Esempio: valutazione dei rapporti tra valori di riflettanza

Quando i dati non sono corretti all'origine contro gli effetti dovuti al terreno, il rapporto può servire a riaggiustare a posteriori

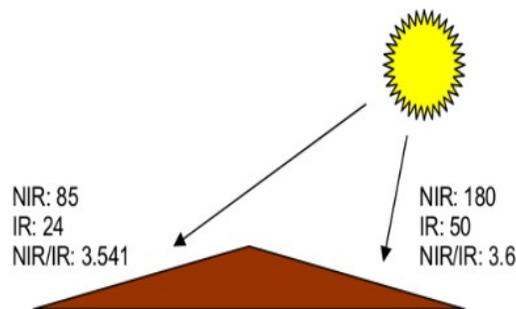


Fig. 29 Effetti dovuti al terreno.

5.7 TRASFORMAZIONI A BASE EMPIRICA

5.7.1 INDICI DI VEGETAZIONE

L'esperienza dei ricercatori sui primi dati Landsat negli anni '70 ha evidenziato notevoli regolarità di comportamento dei dati rilevati su zone vegetate, in generale, ed agricole, in particolare.

Studi successivi hanno mostrato che opportune trasformazioni dell'immagine possono rendere esplicite le proprietà dell'immagine collegate alla vegetazione.

Gli indici di vegetazione derivanti da immagini satellitari o aeree sono un efficace fonte di informazioni per il monitoraggio della copertura vegetale. Questi indici si basano su combinazioni di misure di riflettanza in due o più canali spettrali e sono altamente correlati con parametri associati allo stato di salute delle piante ed a variabili della copertura vegetale, come l'indice di area fogliare (LAI), la frazione di copertura vegetale e la biomassa verde.

Gran parte di questi indici sono basati su combinazioni algebriche della riflettanza nell'intervallo spettrale del rosso (R, 0.6 - 0.7 μm) e nell'infrarosso vicino (NIR, 0.8 -0.9 μm) dal momento che la vegetazione ha un'interazione molto caratteristica con queste due bande spettrali. I pigmenti fotosintetici (principalmente la Clorofilla) assorbono in maniera selettiva la radiazione elettromagnetica incidente, sfruttando soprattutto l'energia nell'intervallo di lunghezza d'onda del visibile; ne risulta una firma spettrale caratterizzata da riflettanza bassa nel blu e nel rosso ed elevata nell'infrarosso vicino a causa della diffusione dell'energia da parte della struttura interna delle foglie.

Il contrasto, tra il rosso e l'infrarosso vicino permette di distinguere nettamente la vegetazione da altri elementi presenti nelle immagini, come suolo o acqua, ed è alla base di una grande varietà di indici quantitativi per misurare la condizione di vegetazione da dati telerilevati.

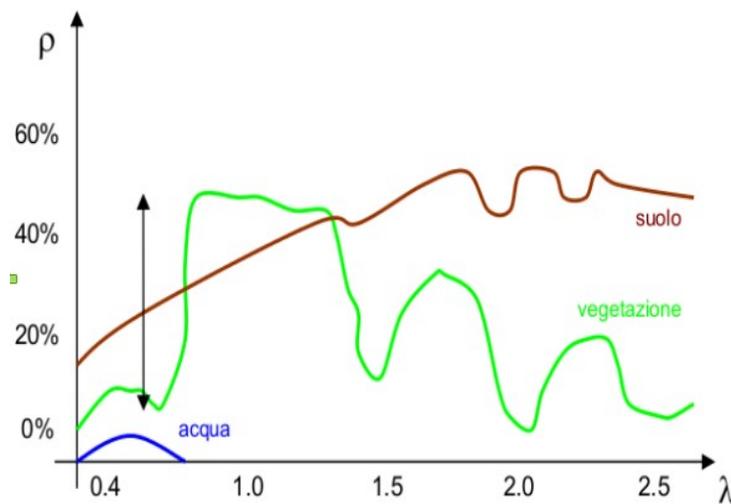


Fig. 30 Firma spettrale dell'acqua, del suolo e della vegetazione.

Gli indici di vegetazione si possono dividere in categorie:

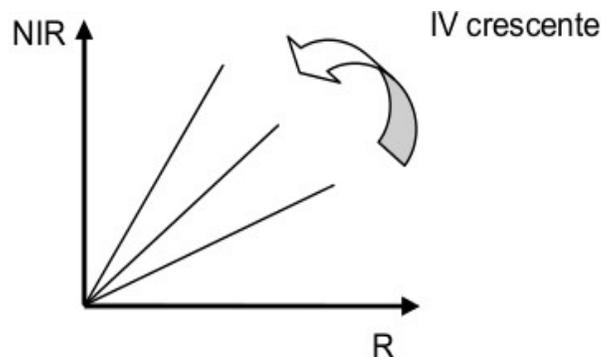
- indici basati sulla pendenza;
- indici basati sulla distanza;
- indici a trasformazioni ortogonali (Tasseled Cap).

Per capire questa distinzione, è necessario considerare la posizione dei pixel della vegetazione in un grafico bidimensionale (o grafico bi-spettrale) di riflettanza: quella del rosso contro quella dell'infrarosso.

5.7.2 INDICI BASATI SULLA PENDENZA

Gli indici basati sulla pendenza sono semplici combinazioni aritmetiche che si concentrano sul contrasto tra il modello della risposta spettrale di vegetazione nel rosso e porzioni del vicino-infrarosso dello spettro elettromagnetico. Si chiamano così perché i diversi valori degli indici sono rappresentati nel grafico bispettrale da linee passanti per l'origine, ma con pendenze diverse.

Idealmente, la semplice pendenza del grafico di dispersione R-NIR dovrebbe fornire un'indicazione dell'entità di vegetazione.



5.7.2.1 NDVI

Nell'ambito dello studio della vegetazione basato su tecniche di Remote Sensing, l'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) è l'indice più diffuso poiché, rispetto agli altri

indicatori proposti in letteratura, consente di meglio enfatizzare le caratteristiche della risposta spettrale delle piante sfruttando il contrasto che vi è tra la riflettanza nel rosso (ρ_R) e nell'infrarosso (ρ_{IR}).

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

L'NDVI fornisce un valore numerico adimensionale, teoricamente compreso tra -1 e +1, che è stato dimostrato essere in stretta relazione con l'attività fotosintetica delle piante e quindi consente di valutare il tipo di vegetazione, lo stato della stessa, e parametri come biomassa e Leaf Area Index (LAI). In particolare, esso assume valori inferiori a 0 per l'acqua, poco superiori a 0 per i suoli e compresi tra 0.4 e 0.7 per la vegetazione (anche se la vegetazione molto secca può avere valori intorno allo 0.2). Solo vegetazioni molto dense arrivano a 0.9.

La vegetazione fitta, a differenza delle superfici brulle o poco vegetate, riflette la radiazione solare relativamente molto di più nel vicino infrarosso che nel visibile di modo che l'NDVI può essere utilizzato come marker spettrale della vegetazione.

Il comportamento caratteristico dei pigmenti delle foglie sane, con una elevata attività fotosintetica, è quello di riflettere soltanto circa il 10% della radiazione ricevuta nella regione spettrale della luce visibile (rosso) e circa il 40% di quella ricevuta nell'infrarosso vicino. Mentre per le foglie sottoposte a stress, con alterazione metabolica, la riflettanza nel rosso aumenta fino a circa il 20%.

Numerosi sono i sensori a bordo delle diverse piattaforme satellitari che, disponendo di bande di acquisizione nelle regioni del rosso e del vicino infrarosso, consentono di calcolare l'NDVI.

Parametri essenziali da considerare nella selezione dei dati satellitari più adatti al tipo di applicazione sono le dinamiche spazio-temporali connesse al fenomeno che si vuole analizzare ed il costo delle immagini, che aumenta proporzionalmente alla risoluzione spaziale. Utilizzando immagini con risoluzione del chilometro (AVHRR) o delle centinaia di metri (MERIS) si possono effettuare analisi a basso costo e su vaste aree, mentre per

ottenere informazioni di maggior dettaglio è necessario utilizzare dati a più elevata risoluzione spaziale come quelli provenienti dal Landsat, IKONOS, QuickBird.

Le applicazioni che si basano sull'utilizzo dell'NDVI sono molteplici e le informazioni ottenibili sono strettamente legate alla risoluzione spaziale-temporale del sensore che si utilizza. Attualmente l'applicazione più diffusa è senz'altro quella cartografica (Land Use), infatti l'elaborazione degli indici di vegetazione fornisce un contributo sostanziale alla realizzazione di carte tematiche di uso del suolo a varie scale, dalla globale alla locale, in dipendenza della risoluzione geometrica del sensore utilizzato consentendo, con i sensori di nuova generazione, finanche la discriminazione della singola chioma.

Effettuando analisi multi-temporali è possibile seguire la fenologia, rilevare le anomalie di breve e lungo periodo ed i cambiamenti di uso del suolo. L'utilizzo dell'indice di vegetazione è alla base della costruzione di mappe di indici di desertificazione e di indici di pericolo di incendio.

L'integrazione dell'NDVI con i canali termici consente l'individuazione di discariche, la perimetrazione delle aree percorse dal fuoco, il monitoraggio dell'erosione delle coste e delle aree urbanizzate.

Negli studi sul bilancio energetico della superficie terrestre, l'NDVI è utilizzato per valutare l'emissività negli algoritmi che legano le misure satellitari alla temperatura del suolo (LST- Land Surface Temperature) e per effettuare stime di evapotraspirazione.

Riassumendo, le informazioni derivabili dall'NDVI sono le seguenti:

- Land Use
- Land Cover Change
- Stress della vegetazione
- fenologia
- LAI (Leaf Area Index)
- NPP (Net Primary Production)
- ET (Evapotraspirazione)
- LST (Land Surface Temperature)

- FDI (Fire Danger Index)
- anomalie di breve e lungo periodo
- indici di desertificazione
- perimetrazione delle aree percorse dal fuoco
- erosione delle coste

5.7.3 INDICI BASATI SULLA DISTANZA

Gli indici basati sulla distanza (o legati alla linea dei suoli) misurano la presenza di vegetazione valutando le differenze nel grafico bispettrale dei valori di riflettanza di ogni punto in relazione a quelli relativi al suolo nudo.

Questo gruppo di indici è derivato essenzialmente dall'indice di vegetazione perpendicolare (Perpendicular Vegetation Index, PVI), che ha l'obiettivo principale di annullare l'effetto del suolo nei casi in cui la vegetazione è rada ed i pixel contengono una miscela di vegetazione verde e di sfondo. Tale situazione è tipica degli ambienti aridi e semiaridi.

La linea di suolo descrive la firma dei suoli in un piano bispettrale rosso-NIR e si ottiene per regressione lineare effettuata su esemplari di pixel di suolo nudo. Ne consegue che i pixel sono attribuibili a suolo o a vegetazione a seconda della distanza dalla linea del suolo.

In generale, le superfici del suolo sono eterogenee e caratterizzate da diversi attributi (umidità, scabrezza, illuminazione, composizione mineralogica e organica, ecc.) che, se uno degli effetti non è dominante sugli altri, producono una dispersione dei punti attorno alla linea del suolo.

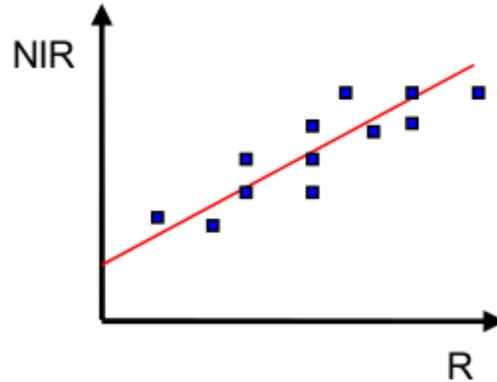


Fig. 31 Linea dei suoli.

Gli indici basati sulla distanza rispetto alla linea del suolo richiedono la pendenza e l'intercetta della linea ottenuta dai punti attribuiti al suolo:

$$\rho_{NIR} = a\rho_R + b$$

5.7.3.1 PVI (PERPENDICULARVEGETATION INDEX)

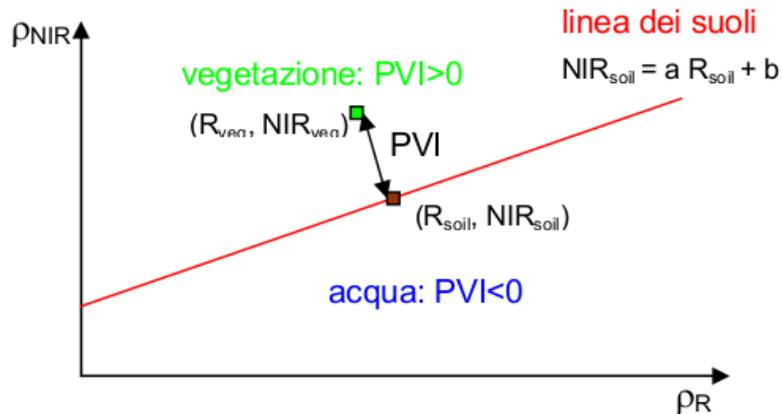
L'indice di vegetazione perpendicolare (PVI), introdotto da Richardson e Wiegand (1977), utilizza la distanza perpendicolare di ogni pixel osservato rispetto alla linea del suolo nel piano NIR-R:

$$PVI = \sqrt{(R_{soil} - R_{veg})^2 + (NIR_{soil} - NIR_{veg})^2}$$

Noti la pendenza e l'intercetta della linea del suolo, il PVI assume la seguente espressione:

$$PVI = \frac{(\rho_{NIR} - a \cdot \rho_R - b)}{\sqrt{a^2 + 1}}$$

Questo indice vale zero sulla linea dei suoli (Indice di Area Fogliare=0) e cresce linearmente man mano che ci si sposta perpendicolarmente ad essa.



5.7.3.2 SAVI (SOIL ADJUSTED VEGETATION INDEX)

Introduce nella formula dell'NDVI un fattore L che tiene conto dell'effetto del suolo ottenibile da un grafico in funzione del LAI della vegetazione e del colore del suolo. Per $L=0$ SAVI=NDVI, per $L=1$ SAVI approssima PVI. Tuttavia, un valore ragionevole nel caso in cui la percentuale di suolo presente nella scena è sconosciuta è $L=0.5$.

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R + L} \times (1 + L)$$

5.7.4 INDICI A TRASFORMAZIONI ORTOGONALI (TASSELED CAP)

La trasformazione di Kauth & Thomas, definita anche Tasseled Cap, propone la generazione di bande sintetiche a contenuto informativo decorrelato e con significato fisico specifico a partire dalle informazioni originali raccolte dai sensori satellitari. Le trasformate che si ottengono vengono definite:

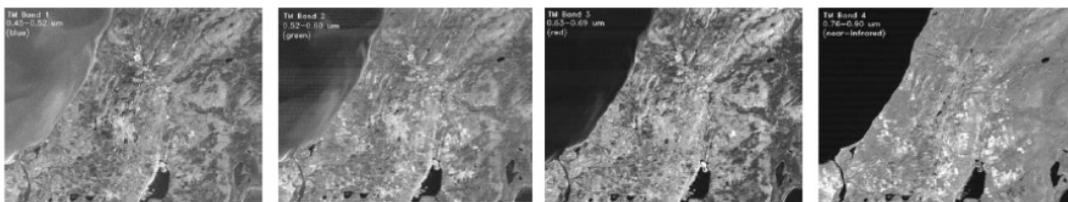
- intensità di radianza (brightness), legata ai valori di riflettanza delle superfici non vegetate;
- indice di verde (greenness) che enfatizza il contrasto tra le bande del visibile e del NIR;

- indice di umidità (wetness) che risente del contrasto tra le regioni del medio-vicino IR e del visibile-vicino IR, con indicazioni su umidità di suoli e biomassa.



5.7.5 ANALISI A COMPONENTI PRINCIPALI

Le diverse bande di un'immagine multispettrale sono spesso altamente correlate tra di loro e pertanto contengono informazioni simili. Ad esempio, le bande 2 e 3 del Landsat TM (rispettivamente verde e rosso) presentano tipicamente lo stesso aspetto se visualizzate in scala di grigi a parità di copertura del suolo. Le tecniche di trasformazione basate sulla statistica multivariata di dataset multibanda possono essere utilizzate per ridurre la ridondanza dei dati e la correlazione tra bande. Una di queste trasformazioni è detta analisi delle componenti principali (Principal Components Analysis, PCA).



Nella stessa scena, bande diverse possono essere più o meno fortemente correlate tra di loro, specie se le loro frequenze centrali sono vicine. L'analisi alle componenti principali

(PCA) comprende una procedura matematica che trasforma un certo numero di variabili (eventualmente) correlate in un numero (inferiore) di variabili non correlate dette componenti principali.

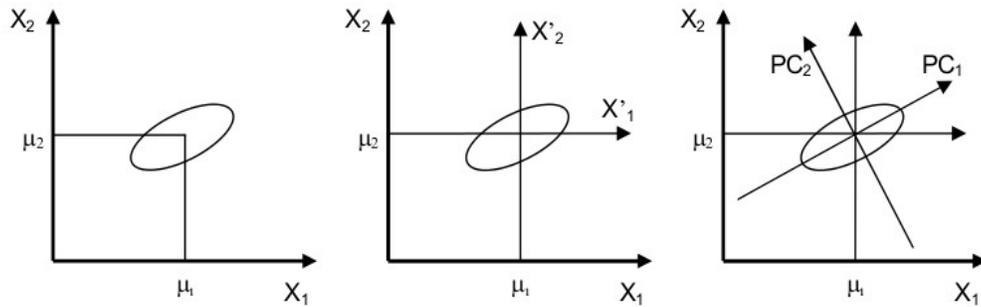
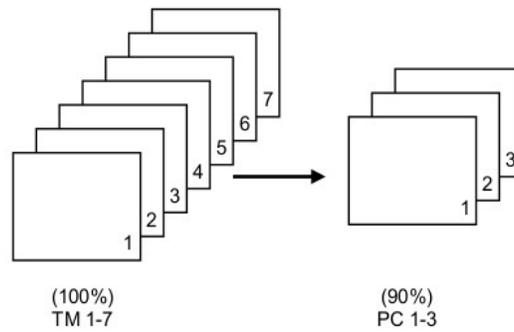
La prima componente principale raccoglie dai dati la massima variabilità possibile, mentre ogni componente successiva raccoglie il massimo possibile del rimanente.

Quando siamo in una situazione di forte correlazione tra le bande di un'immagine telerilevata, può convenire modificare la rappresentazione dei dati in modo da eliminare o comunque ridurre la correlazione tra bande. Date due variabili casuali X ed Y, il coefficiente di correlazione tra di esse è definito come:

$$\rho_{xy} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E((X - \mu_X)(Y - \mu_Y))}{\sigma_X \sigma_Y}$$

Il valore che si ottiene è necessariamente compreso tra -1 e +1; in particolare, +1 e -1 indicano dipendenza lineare perfetta, mentre valori prossimi allo zero indicano assenza di dipendenza lineare (non è detto che non ve ne siano di altro genere).

In altre parole, si trasformano i vettori che rappresentano i valori dei pixel sulle diverse bande in modo che i nuovi vettori abbiano la minima correlazione reciproca. Il risultato è la cosiddetta rappresentazione a componenti principali.



La trasformazione PCA altro non è che una combinazione lineare pesata, in quanto produce un nuovo set di bande, dette componenti, moltiplicando ognuna della bande nell'immagine originaria per un peso e sommando i prodotti così ottenuti. I pesi utilizzati nella trasformazione sono gli autovettori. Il numero di equazioni che governano la trasformazione e quello delle immagini componenti sarà pari al numero di bande dell'immagine di partenza.

La trasformazione PCA comporta la rotazione degli assi dello scatterogramma in modo tale da ridurre la correlazione tra bande. La prima componente principale è caratterizzata dalla massima variabilità nello spazio a n dimensioni definito dal numero delle bande, mentre le prime tre componenti generalmente comprendono oltre il 90% delle informazioni dell'immagine.

5.7.5.1 MINIMUM NOISE FRACTION

Un'altra metodologia utilizzata per ridurre la ridondanza dei dati iperspettrali è la Minimum Noise Fraction (MNF), che consente di separare il rumore dai dati. La trasformazione MNF è una trasformazione lineare data dall'applicazione di due trasformazioni PCA a cascata. In particolare, la prima elimina la correlazione e riduce il rumore nei dati. Infatti, a seguito della prima trasformazione, il rumore tenderà ad avere varianza unitaria ed assenza di correlazione con le varie bande. Infine, la seconda trasformazione è una PCA standard basata su una distribuzione casuale di rumore (white noise). Disponendo del modello del rumore che affligge l'immagine, è possibile, ad esempio, scegliere tra il criterio di massima varianza decrescente oppure del minimo rumore crescente.

5.7.6 TRASFORMAZIONI NELLO SPAZIO IHS

Nella percezione umana dello spettro visibile il colore prevalente nella radianza uscente viene detto dominante, ma curve spettrali diverse possono suscitare impressioni dominanti analoghe (colori metamerici). Occorre definire oggettivamente i colori che percepiamo soggettivamente. Alcuni caratteri del colore (tinta, saturazione ed intensità) rispondono a sensazioni riconoscibili dall'occhio umano. IHS è un acronimo che sta per:

- I o Intensity: intensità, ovvero luminosità del pixel
- H o Hue: tinta, ovvero giallo piuttosto che violetto
- S o Saturation: saturazione, ovvero distanza dal grigio più vicino.

E' possibile realizzare l'operazione di trasformazione dallo spazio dei colori RGB allo spazio IHS: tale trasformazione può essere utilizzata per migliorare la risoluzione di un'immagine tri-banda avendo a disposizione un'ulteriore immagine coregistrata a risoluzione più alta.

5.7.6.1 MIGLIORAMENTO DELLA RISOLUZIONE

Per molti sensori ci sono dati pancromatici ad alta risoluzione e dati multispettrali a risoluzione ridotta. Sarebbe utile avere le caratteristiche migliori di entrambi i tipi di dati, cioè prodotti ad alta risoluzione ma ancora multispettrali. È infatti intuitivo che l'unione delle capacità multispettrali e di un buon livello di dettaglio permette una migliore e più precisa classificazione delle immagini.

Avendo a disposizione un'immagine tri-banda a bassa risoluzione (LR) ed una monobanda ad alta risoluzione (HR), si procede come segue:

- i dati a bassa risoluzione sono ricampionati ad alta risoluzione;
- si applica la trasformazione IHS;
- l'intensità è rimpiazzata con quella ad alta risoluzione;
- si torna indietro alla rappresentazione in RGB.

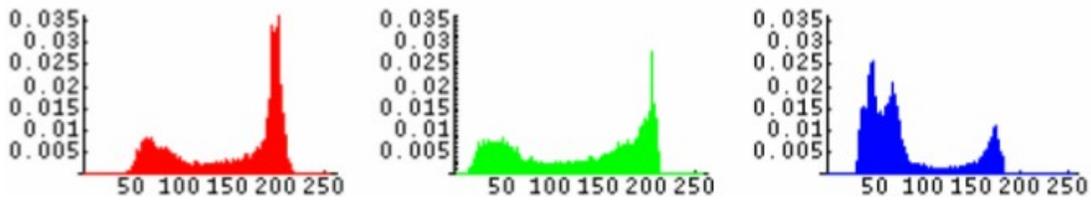
Si assume che vi sia correlazione significativa tra le tre bande LR e la banda HR, il che generalmente succede quando le tre bande sono un sottoinsieme spettrale della banda HR.

5.7.7 TRASFORMAZIONI SULL'ISTOGRAMMA

Un istogramma, in generale, è un diagramma che mostra per ogni valore di una determinata variabile una determinata quantità ad essa associata che, generalmente, è la frequenza od altre quantità ad essa assimilate, rappresentata tramite una linea verticale per ogni valore in ascisse.

L'istogramma di un'immagine rappresenta in ascissa il valore del pixel (DN), in ordinata la frequenza relativa o assoluta di comparsa di tale valore nell'immagine o nella zona considerata.

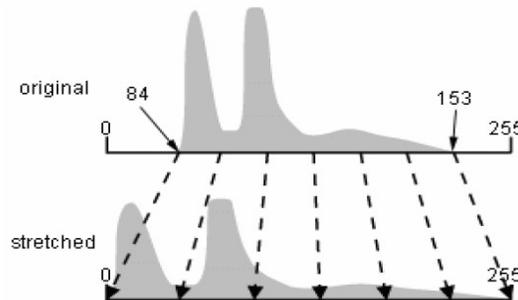
Per le immagini a colori, si traccia un istogramma per ognuna delle componenti indipendenti; ad esempio per la rappresentazione RGB si tracciano i tre istogrammi con le frequenze dei DN relativi a rosso, verde, blu.



Sull'istogramma possono essere effettuate diverse operazioni che comportano generalmente una sostituzione dei vecchi valori dei DN con nuovi valori determinati dalla particolare operazione compiuta. Le operazioni sull'istogramma non hanno conseguenze sull'organizzazione spaziale delle immagini, salvo trasformazioni non univoche. Le operazioni sull'istogramma servono in generale solo a rendere meglio visibile il contenuto dell'immagine.

5.7.7.1 ESPANSIONE (STRETCH) LINEARE

Un'espansione lineare implica il calcolo del limite inferiore e superiore dell'istogramma (normalmente, il minimo e il massimo valore di luminosità dell'immagine) e porta a trasformare questo intervallo di valori nel pieno intervallo dei possibili valori d'immagine.



Spesso l'istogramma dell'immagine ha code molto lunghe e, pertanto, il massimo ed il minimo valore non sono rappresentativi della gamma dei valori più frequentemente incontrati nell'immagine. In questo caso se si effettuasse una semplice espansione lineare basandosi sul massimo e sul minimo si sottostimerebbe il coefficiente di espansione, con il risultato di ottenere un'immagine ancora troppo poco contrastata.

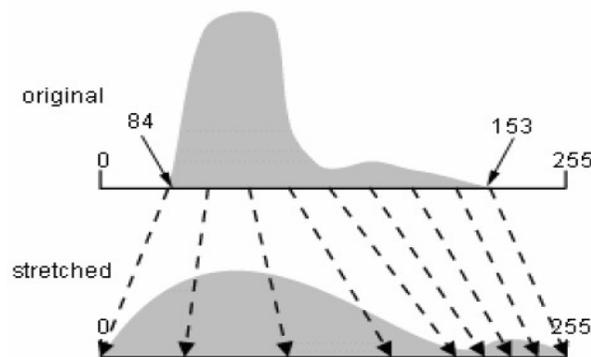
5.7.7.2 ESPANSIONE LINEARE CON TAGLIO DELLE CODE

Un possibile rimedio consiste nell'eliminare una quantità percentuale prestabilita (in genere intorno al 2%) di valori di pixel dai due estremi prima di effettuare l'espansione lineare. In questo modo si perde una piccola quantità di informazione, ma si rende il contenuto dell'immagine molto più visibile.

5.7.7.3 EQUALIZZAZIONE

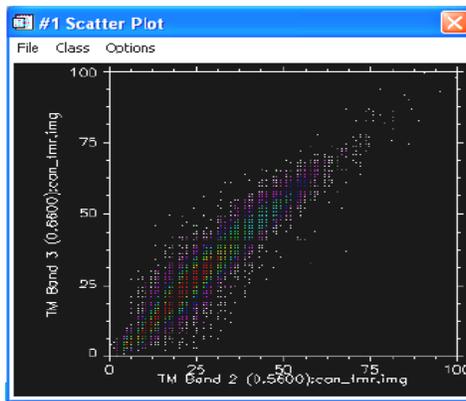
Se l'intervallo dei valori di grigio non è uniformemente distribuito, si può usare un'equalizzazione.

Si assegna un intervallo di più valori alle porzioni dell'istogramma che si presentano con maggior frequenza in ingresso, riducendone perciò la frequenza in uscita. In questo modo, il dettaglio in queste aree sarà reso più visibile rispetto a quelle aree dell'istogramma originale i cui valori ricorrono meno frequentemente. Il risultato dell'equalizzazione è ben diverso da quello dell'espansione lineare: alcune cose si vedono meglio, mentre altre sono meno chiare.



5.7.7.4 I DIAGRAMMI DI DISPERSIONE (SCATTER PLOT)

Esiste un analogo bidimensionale (nei dati) all'istogramma, che prende il nome di diagramma di dispersione. All'incrocio di riga e colonna può essere segnalata semplicemente la presenza di un dato, oppure la frequenza del dato stesso, utilizzando ad esempio una scala di colori.



5.7.8 FILTRI DIGITALI

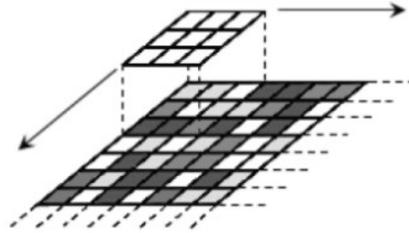
I filtri digitali sono operatori locali di convoluzione o finestre mobili che trasformano in modo lineare e localizzato le immagini permettendo di estrarre elementi caratteristici di interesse.

Un operatore si dice locale se il risultato della sua applicazione ad un pixel dipende solamente dal valore dei pixel appartenenti ad un suo intorno ed eventualmente dal valore del pixel stesso. In altri termini, i filtri sono metodi di trasformazione di immagini nei quali i valori di ciascun nuovo pixel vengono calcolati in funzione del valore del corrispondente pixel e della sua posizione nell'immagine originale. Una trasformazione mediante finestra mobile è invariante per traslazione. I coefficienti dell'operazione eseguita su un pixel e sul suo intorno possono essere organizzati in forma di matrice definita come nucleo della convoluzione o kernel. Il nucleo viene centrato su ciascun elemento dell'immagine e ognuno dei pixel vicini viene moltiplicato per il corrispondente coefficiente; il nuovo valore del pixel viene calcolato sulla base del suo nuovo intorno tramite l'operazione definita dallo scopo della convoluzione (in genere si tratta di una somma):

$f(x-1,y-1)$	$f(x,y-1)$	$f(x+1,y-1)$
$f(x-1,y)$	$f(x,y)$	$f(x+1,y)$
$f(x-1,y+1)$	$f(x,y+1)$	$f(x+1,y+1)$

$w(-1,-1)$	$w(0,-1)$	$w(1,-1)$
$w(-1,0)$	$w(0,0)$	$w(1,0)$
$w(-1,1)$	$w(0,1)$	$w(1,1)$

$$g(x,y) = \sum_{i=-a}^a \sum_{j=-b}^b w(i,j) f(x+i,y+j)$$



In una operazione di convoluzione si sostituisce il valore del pixel con il risultato di una o più operazioni elementari eseguite sull'elemento stesso e sugli elementi del suo intorno; ciascun elemento del gruppo considerato viene moltiplicato per dei coefficienti dipendenti dal tipo di operazione che si vuole svolgere. Tali coefficienti possono assumere anche valori negativi. Il risultato sarà una nuova immagine avente le stesse dimensioni dell'immagine di partenza, dove gli elementi situati sui margini nell'immagine risultante non avranno un valore significativo, non essendo stato possibile costruire loro una maschera completa. Per sostituire ad ogni elemento dell'immagine la sua media con gli elementi dell'intorno 3x3 si applica il nucleo:

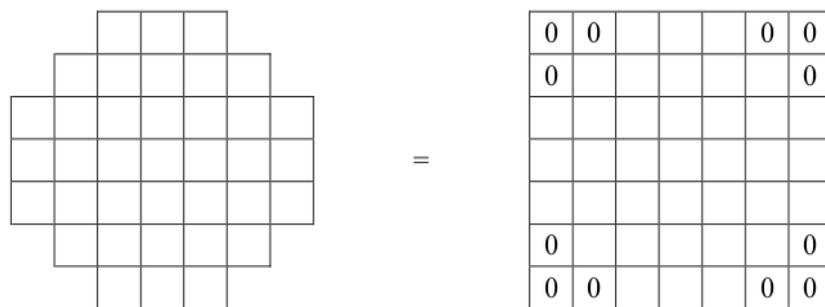
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

Gli elementi dell'intorno risulteranno quindi tutti moltiplicati per il coefficiente 1/9; i nove prodotti verranno sommati e il risultato di tale operazione sarà il nuovo valore di

grigio dell'elemento immagine. Questa operazione viene ripetuta facendo scorrere il nucleo della convoluzione in modo che sia centrato progressivamente su tutti i pixel dell'immagine (media viaggiante o mean trip). I valori dei coefficienti della trasformazione dipendono unicamente dalla posizione relativa dei pixel nella finestra mobile rispetto al pixel centrale.

E' importante notare che la convoluzione di una combinazione lineare di immagini è uguale alla combinazione lineare delle convoluzione delle immagini.

Gli intorni solitamente più usati sono quelli quadrati: 3x3, 5x5, 7x7, etc. Sono utilizzati anche intorni aventi forma rettangolare, circolare o anche più complessa e numero di elementi variabile di conseguenza. Nelle finestre circolari sono utilizzati nel calcolo solo i pixel compresi entro una distanza assegnata dal pixel centrale; sono di fatto finestre quadrate a cui sono attribuiti valori nulli a determinati coefficienti della matrice. La loro scelta dipende principalmente dalle risorse di calcolo e dal significato dell'operazione.



Matrice di un filtro circolare

Le trasformazioni mediante finestre mobili sono distinte in due classi principali, in funzione delle caratteristiche dell'immagine prodotta:

- filtri passa-basso: trasformazioni che forniscono immagini più lisce delle originali, cioè immagini in cui sono evidenziate le caratteristiche dominanti (elementi a bassa frequenza), mentre sono eliminati i dettagli (elementi ad alta frequenza);
- filtri passa-alto: trasformazioni che esaltano i dettagli, cioè le variazioni di valori su piccola distanza (alte frequenze) eliminando i fenomeni a bassa frequenza.

Mentre un filtro passa-basso ha l'effetto di ridurre il contrasto (ampiezza dell'intervallo di valori di grigio) e di smussare i bordi, un filtro passa-alto esalta le zone in cui i valori subiscono bruschi cambiamenti.

5.7.8.1 FILTRI PASSA-BASSO (LOW PASS FILTER)

Un metodo semplice per implementare un filtro passa-basso è di eseguire una media dei valori in un intorno del pixel da trasformare e di sostituirvi il valore così calcolato. E' il caso di filtro passa-basso detto della media mobile. Si applica cioè l'operatore di convoluzione con uno dei nuclei:

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

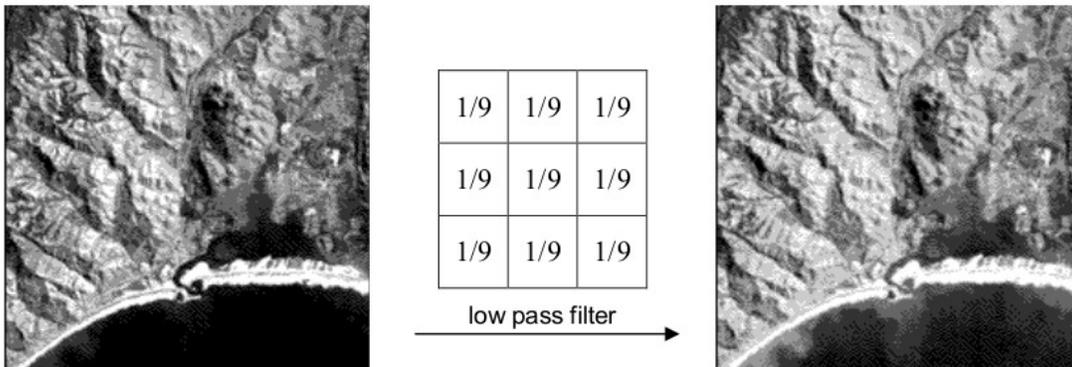
1/25	1/25	1/25	1/25	1/25
1/25	1/25	1/25	1/25	1/25
1/25	1/25	1/25	1/25	1/25
1/25	1/25	1/25	1/25	1/25
1/25	1/25	1/25	1/25	1/25

Le dimensioni dell'intorno influiscono direttamente sull'intensità dell'effetto di smussamento. La media mobile pesata costituisce una variante al caso precedente. Ai pixel della finestra vengono assegnati pesi differenti decrescenti dal centro verso la periferia:

1/15	1/15	1/15
1/15	1/15	1/15
1/15	1/15	1/15

1/10	1/10	1/10
1/10	1/10	1/10
1/10	1/10	1/10

La mediana mobile è un'alternativa della media mobile. La mediana di un insieme di valori è definita come il valore centrale della distribuzione dei dati, ordinati per valore crescente.



5.7.8.2 FILTRI PASSA-ALTO (HIGH PASS FILTER)

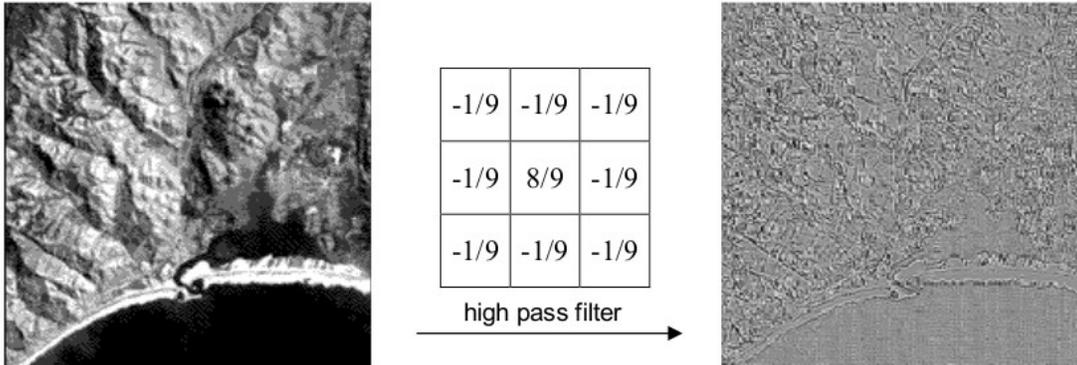
Un filtro passa-alto permette solo alle componenti ad alta variabilità di mantenersi. In questo modo, il filtro esalta le discontinuità tra le diverse aree (che normalmente corrispondono a toni di grigio, cioè valori di DN, differenti). Un filtro passa-alto serve quindi per rendere più evidenti i contorni di una immagine. Un semplice filtro passa-alto può essere implementato sottraendo dall'immagine originale il risultato dell'applicazione di un filtro passa-basso. Un altro sistema è quello di applicare una convoluzione con un nucleo che ha un coefficiente positivo per il pixel centrale e coefficienti negativi per i pixel dell'intorno. Per esempio:

-1/9	-1/9	-1/9
-1/9	8/9	-1/9
-1/9	-1/9	-1/9

Il risultato della trasformazione porta ad una immagine molto diversa nell'aspetto dall'originale consentendo tuttavia l'identificazione degli elementi caratteristici presenti (faglie, fiumi, strade, ferrovie, ecc.).

In particolare, le identità lineari individuabili possono essere di due tipi:

- bordi o confini tra aree omogenee, identificabili come linee ideali;
- linee di larghezza di uno o più pixel aventi valori omogenei tra loro e marcatamente differenti rispetto ai circostanti.



5.7.8.3 EDGE DETECTION

I filtri passa-alto si prestano alla soluzione di un problema ricorrente nell'analisi delle immagini: l'identificazione dei bordi e delle linee, cioè delle regioni di confine tra oggetti differenti rappresentati nell'immagine (edge detection). La funzione di questi filtri è di assegnare valori elevati ai pixel che rappresentano linee reali isolate circondate da aree omogenee.

Nei filtri a finestre mobili, le linee sono identificate attribuendo un valore maggiore lungo la riga, colonna o diagonale centrale, in funzione della direzione che si intende analizzare. A tale scopo, si esaltano nell'immagine le zone di transizione tra valori differenti applicando un filtro passa-alto isotropo nelle diverse direzioni. Queste operazioni non simmetriche rispetto al pixel cui vengono applicate, si chiamano anche derivate, per l'analogia con l'operazione di differenziazione di una funzione continua. Un certo bordo in una immagine è caratterizzato da derivata nulla lungo la direzione del bordo e derivata massima lungo la corrispondente direzione ortogonale. Le seguenti finestre mobili sono esempi per l'identificazione di bordi nelle direzioni preferenziali orizzontale, verticale o diagonali opposte:

-1	-1	-1	-1	0	1	0	1	1	1	1	0
0	0	0	-1	0	1	-1	0	1	1	0	-1
1	1	1	-1	0	1	-1	-1	0	0	-1	-1
orizzontale			verticale			diagonali					

Analogamente si riportano esempi di finestre mobili per l'identificazione di linee in cui nelle celle della finestra sono assegnati valori negativi per avere valori nulli nelle aree omogenee. Si ottengono così delle strisce di segno opposto ai due lati paralleli della linea da identificare:

-1	-1	-1	-1	2	-1	2	-1	-1	-1	-1	2
2	2	2	-1	2	-1	-1	2	-1	-1	2	-1
-1	-1	-1	-1	2	-1	-1	-1	2	2	-1	-1
E-O			N-S			NO-SE			NE-SO		

Per identificare tutti i bordi di una immagine bisogna applicare separatamente gli esempi riportati e poi combinarli. E' possibile combinare filtri che raggruppano due o più di queste direzioni

-1	-1	-1	1	-2	1
-1	8	-1	-2	4	-2
-1	-1	-1	1	-2	1

basandosi sull'analisi di Laplace (filtri laplaciani); per esempio: costituendo un gradiente che tiene conto dei cambiamenti nel valore di grigio degli otto pixel vicini.

5.7.8.4 ALTRE TECNICHE DI FILTRATURA

Esistono altre tecniche di filtratura che usano algoritmi non lineari per stabilire il valore da assegnare al pixel al centro della finestra sulla quale si sta effettuando l'operazione.

I tipi principali sono:

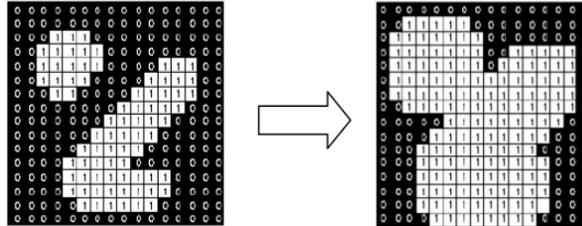
- operazioni morfologiche;
- filtri basati sulle misure di tessitura (o, brevemente, filtri di tessitura o texture filters);
- filtri adattativi.

5.7.8.5 OPERAZIONI MORFOLOGICHE

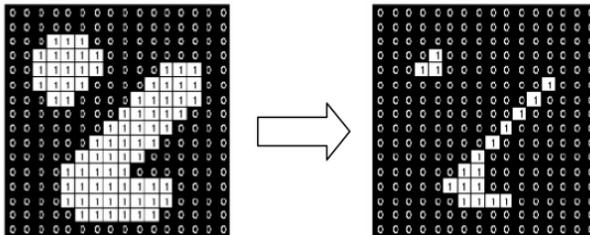
La finestra rettangolare è sostituita da una configurazione di pixel di forma qualunque, detta elemento costitutivo. Ogni pixel assume il valore risultato di un'operazione effettuata sui valori dei pixel contenuti nell'elemento costitutivo centrato su quel pixel. Se l'operazione è il max l'operazione viene detta dilatazione, perché le figure (insiemi di pixel con valori maggiori rispetto al valore dello sfondo) ne escono dilatate. Se invece l'operazione è il min, l'operazione viene detta erosione, per il motivo opposto.

1	1	1
1	1	1
1	1	1

Elemento costitutivo



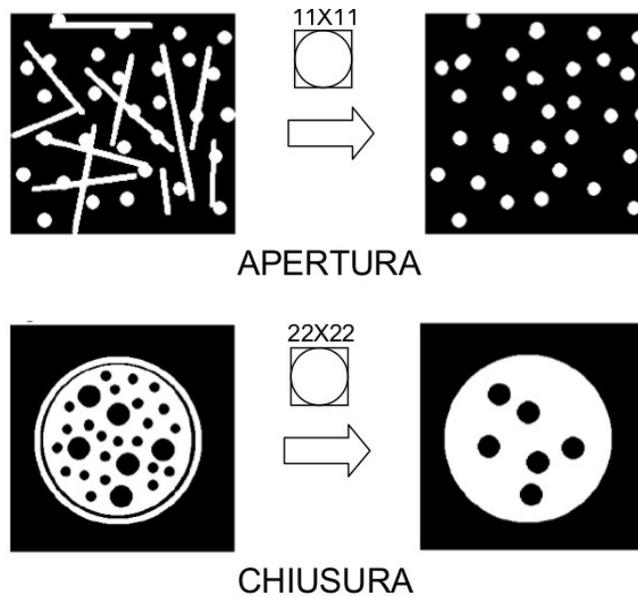
DILATAZIONE



EROSIONE

L'insieme di una erosione seguita da una dilatazione, effettuate entrambe con lo stesso elemento costitutivo, viene detto apertura, perché il risultato è un'interruzione delle connessioni tra figure.

Una dilatazione seguita da una erosione, effettuate con lo stesso elemento costitutivo, viene detta chiusura, perché il risultato è una soppressione dei vuoti di dimensioni inferiori a quelle dell'elemento costitutivo.



5.7.8.6 FILTRI DI TESSITURA

I filtri di tessitura forniscono valori che dipendono dalle configurazioni locali di DN, ed in particolare dalle loro statistiche locali. Le statistiche sono calcolate sui pixel contenuti in una finestra di una dimensione fissata attorno al pixel che si sta considerando (e che acquisterà come valore la statistica che si sta calcolando). I filtri di tessitura hanno quindi un parametro caratterizzante, che è la dimensione della finestra di acquisizione dei campioni. Il risultato si chiama mappa di tessitura.

Tipi di filtri di tessitura utilizzati più di frequente:

- Dinamica locale: evidenzia i contorni.
- Varianza;
- Entropia;
- Media (coincide col filtro a media viaggiante, passa-basso)
- Obliquità (skewness)

5.7.8.7 FILTRI ADATTATIVI

Tutti filtri visti finora usano la stessa strategia ed, in particolare, gli stessi pesi su tutta l'immagine.

Questa non è detto sia sempre la strategia migliore, perché può darsi che le caratteristiche dell'immagine varino da punto a punto o da zona a zona; il tipico esempio è il rumore speckle in immagini SAR. Se i parametri si possono stimare dalla porzione locale dell'immagine si può utilizzare un opportuno filtro che adatti il proprio comportamento alla situazione locale. Un filtro siffatto si chiama adattativo. Esempio: filtro gamma per rimuovere lo speckle da immagini SAR.

5.7.9 RAPPRESENTAZIONE DELLE IMMAGINI

Esiste un'ultima categoria di trasformazioni, con il termine inteso in senso lato, che servono a migliorare la visibilità di determinate caratteristiche del dato al fine di facilitarne l'interpretazione visiva, indicate con il nome di tecniche di enfattizzazione (enhancement).

L'enfattizzazione può avvenire mediante diverse tecniche distinguibili in due categorie, a seconda che alterino o meno i valori originali dei pixel dell'immagine. Tra i metodi che modificano il contenuto iniziale dei pixel, i più comuni sono:

- lo stretch
- i filtri

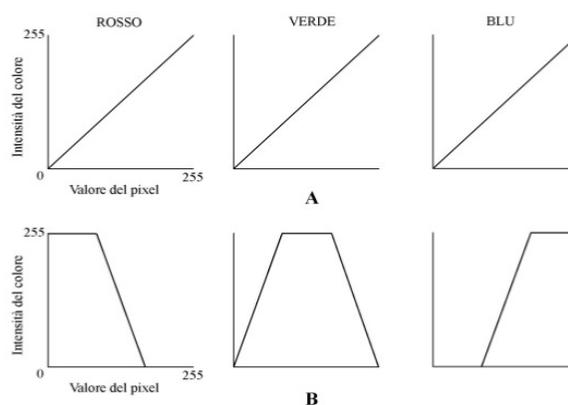
di cui si è parlato già in precedenza.

Tra i metodi che invece non alterano i valori originali ci sono:

- le visualizzazioni in pseudocolore e
- le composizioni in falsi colori.

5.7.9.1 VISUALIZZAZIONE IN PSEUDOCOLORI

La visualizzazione in pseudocolori consiste nel processo di generazione di un'immagine da un'altra monocromatica attraverso una mappatura di ciascun livello di grigio su un punto nella scala dei colori. Semplicemente si assegna un colore ad ogni intervallo di grigi tramite regole descritte da una tabella di look-up (LUT). In particolare, si basa su delle modifiche nella forma delle LUT relative ai tre colori primari (caso B in figura). Nel caso più semplice, la visualizzazione in pseudocolori è ottenuta assegnando ad ogni intervallo di colori veri un colore medio.



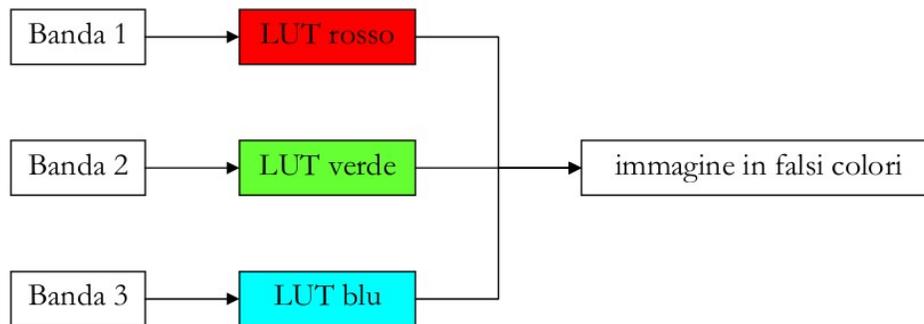
5.7.9.2 RAPPRESENTAZIONE IN FALSI COLORI

La rappresentazione in falsi colori consiste in una tecnica di combinazione dei tre colori principali (rosso, verde e blu) al fine di ottenere una migliore rappresentazione dei dati. In particolare, tale tecnica consiste nel creare una nuova immagine che, in luogo dei tre canali RGB, associa tre diverse immagini ognuna delle quali acquisita in una differente banda spettrale.

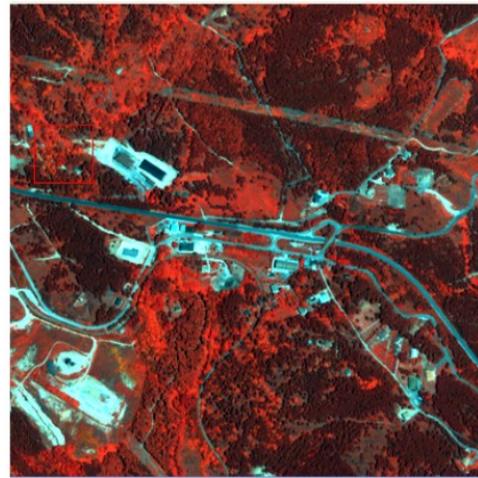
Se si assegna un colore ad una particolare banda spettrale e la si combina con altre si realizza una composizione a colori e l'immagine ottenuta evidenzia informazioni difficilmente ricavabili dalle componenti considerate singolarmente.

La scelta delle tre bande da rappresentare in falsi colori determina le caratteristiche della superficie terrestre che si vogliono evidenziare. Ad esempio, una classica combinazione del TM è RGB:432.

In questo caso la vegetazione apparirà rossa-magenta (poiché riflette nel verde e nel NIR che vengono rispettivamente rappresentati nel canale del blu e del rosso).



**Rappresentazione in veri colori
(R=band 3, G=band 2, B=band 1)**



**Rappresentazione in falsi colori
(R=band 4, G=band 2, B=band 1)**

Sensore: Quickbird, risoluzione spaziale 2.8 m, 4 bande (B, G, R, NIR), località: San Giovanni in Fiore

I colori dell'immagine risultante sono dissimili da quelli presenti nel mondo reale, ma spesso utili per distinguere i diversi elementi dell'immagine o i tipi di superfici, quali sabbia, mare, foresta e aree edificate, ecc. Ad esempio, in figura, enfatizzando con il NIR, i valori più elevati (rosso brillante) rappresentano i prati, i boschi di latifoglie, di conifere (rosso scuro) e così via.

Questo tipo di rappresentazione scaturisce dal fatto che l'occhio umano è più sensibile ai colori che ai livelli di grigio. Infatti, l'occhio umano è in grado di distinguere non più di 30 differenti tonalità di grigio su una stessa immagine, mentre può riconoscere centinaia di colori diversi.

5.8 FIRMA SPETTRALE E FIRMA SPAZIALE

La firma spettrale è una caratteristica specifica di ogni materiale ed è definita per ogni combinazione di riflessi e assorbimenti delle radiazioni elettromagnetiche a diverse lunghezze d'onda. Conoscendo la firma spettrale di un oggetto, è possibile identificarlo univocamente. Ricordando che un'immagine da satellite è più di un'ortofoto è possibile 'sfruttare' le possibilità offerte dal sensore andando a classificare la scena in base alle risposte spettrali

Oltre alle firme spettrali, si potrebbero considerare le firme spaziali degli oggetti, e questo discorso è valido particolarmente per individuare oggetti sparsi sul territorio come le case. Difatti, le case sparse e/o rurali sono circondate da aree non tipicamente urbane e proprio queste potrebbero rappresentare un fattore discriminante. Riconoscendo l'edificio come pixel urbano contiguo a pixel vegetazione o pixel suolo nudo, si ottiene un'ulteriore informazione. Addirittura si potrebbe differenziare la casa sparsa ad uso residenziale da quella rurale, in quanto questa ultima avrà verosimilmente contiguità con pixel di varie colture (anche queste potrebbero essere studiate perché tipiche da luogo a luogo).



Fig. 32 Pixel relativi ad una casa sparsa residenziale (a sinistra) e pixel relativi ad una casa rurale (a destra)

Tutte queste analisi potrebbero poi sfociare in un'indagine di verifica approfondita sul campo (utili anche per testare le tecniche) attraverso l'uso di palmari GIS.

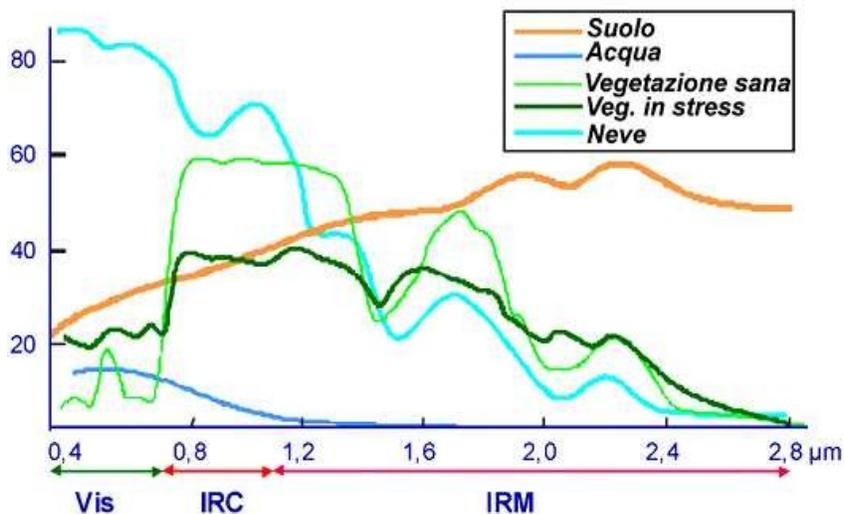


Fig. 33

Firme spettrali "tipo"

5.9 LE TECNICHE

5.9.1 CLASSIFICAZIONE SUPERVISIONATA E NON SUPERVISIONATA

Uno dei metodi più utilizzati per estrarre informazioni dai dati telerilevati è la classificazione delle immagini. Il processo di classificazione consente di identificare

nell'immagine digitale i pixel caratterizzati da risposte spettrali molto simili e di raggrupparli in categorie che rappresentano le classi osservabili al suolo. Le tecniche di classificazione possono essere distinte in supervisionate e non supervisionate. La classificazione non supervisionata non richiede la conoscenza a priori degli elementi da discriminare sulla scena, ma si basa solamente sui valori dei pixel dell'immagine, aggregando i dati in cluster. La classificazione supervisionata, invece, implica da parte dell'operatore come input un numero di aree di prova (training areas) derivanti da specifiche "regioni di interesse" (Region Of Interest, ROI). A tal proposito, gli spettri di input possono essere ricavati da ROI accuratamente individuate nella scena attraverso l'analisi visiva in RGB (Red, Green, Blue) oppure, con l'ausilio di tecniche GIS, utilizzando una cartografia tecnica o tematica dell'urbano relativa allo stesso periodo dell'immagine, georiferita nello stesso sistema di riferimento (ad esempio attraverso i Ground Control Points) e sovrapposta all'immagine. Fra l'altro, a scale di buon dettaglio (1:10000, 1:25000) potrebbe essere possibile individuare ROI diverse all'interno dello stesso ambito urbano (ad esempio rispetto alle diverse coperture degli edifici, oppure distinguere le zone industriali da quelle residenziali). In questo modo si ottengono gli spettri tipici di ogni classe (training set), con i quali si può effettuare la classificazione dell'intera scena, che avviene per confronto tra i pixel dell'immagine e le risposte spettrali delle classi di interesse, secondo un criterio di somiglianza prescelto (algoritmo di classificazione). I due sistemi illustrati rispondono ad esigenze di classificazione diverse: quando è importante mettere in relazione i gruppi di pixel con categorie di copertura effettivamente presenti sulla scena, il metodo supervisionato permette di definire delle classi informative di estrema utilità. Quando invece si devono analizzare superfici poco conosciute e scarsamente accessibili, la tecnica non supervisionata consente di eseguire in via preliminare un'analisi esplorativa dell'immagine, definendo i gruppi di pixel in termini di classi spettrali (Mather, 1999). Ecco perché nel seguente studio si favorisce la classificazione supervisionata. Ottenuta la classificazione, è opportuno sottoporla a verifica attraverso aree di coperture note che devono però essere diverse dalle training areas.

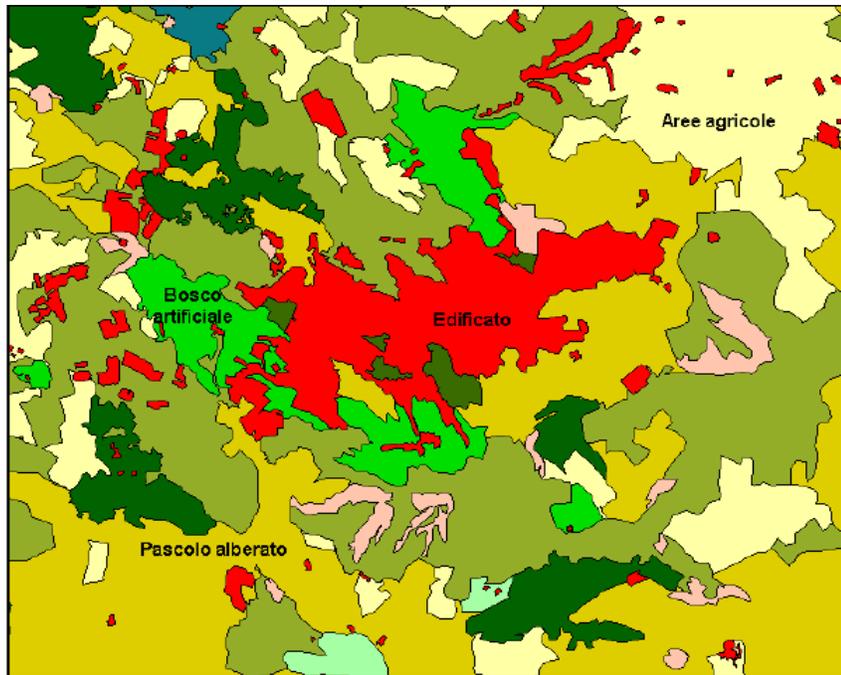


Fig. 34 Esempio di classificazione

5.10 INDICI SPETTRALI

Combinando le diverse bande spettrali a disposizione è possibile ricavare informazioni che caratterizzano le superfici. Mentre le firme spettrali descrivono il

comportamento di un pixel lungo tutto lo spettro, gli indici mostrano delle particolarità delle aree esaminate. La scelta dell'indice da utilizzare dipende dal fenomeno che si vuole studiare e dalle lunghezze d'onda delle bande disponibili. In questo lavoro è stato applicato l'indice sulla vegetazione NDVI e l'indice sulle aree urbanizzate BAI - Built-up Areas Index.

L'NDVI, già trattato in precedenza, è l'indice di vegetazione più diffuso e utilizza la radianza (o riflettenza) del canale RED e del canale NIR. Il primo è localizzato nella zona di massimo assorbimento della clorofilla, mentre il secondo è localizzato nel plateau di alta riflettenza, dovuto alle componenti di parete cellulare (Rouese et al, 1974; Tucker, 1979). L'indice pertanto è correlato con la presenza (densità) di biomassa verde ed, in particolare, mette in relazione l'assorbimento spettrale della clorofilla nel rosso con la

tipica riflessione nel vicino infrarosso, dove è fortemente influenzata dal tipo di struttura fogliare (Gomasca, 1997). Il valore dell'NDVI fornisce informazioni sui cambiamenti del territorio che possono essere derivate in maniera facilmente interpretabile, producendo delle carte di uso/copertura del suolo per epoche diverse. In tal senso è probabilmente opportuno applicare anche l'algoritmo NDVI (magari utilizzando la tecnica MCV per la quale è fondamentale un'ottima georeferenziazione) per individuare la vegetazione. Chiaramente, il passo successivo da fare è quello di effettuare delle operazioni tra due (o più) immagini trattate allo stesso modo, ma relative a periodi differenti (5-10 anni). Questo perché è noto che il fenomeno dell'espansione urbana, spesso non controllato, avviene proprio a discapito della vegetazione. Le operazioni effettuabili sono somma, differenza e rapporto tra immagini e vengono effettuate pixel per pixel. Questo vuol dire il pixel della immagine A verrà relazionato (a seconda dell'operazione) col pixel corrispondente dell'immagine B. La somma di due immagini ci fornisce in output per ogni pixel la somma dei digital number dei pixel delle immagini di input. Così facendo in un'unica immagine ottengo l'informazione proveniente da due immagini con dei contrasti tra i colori maggiori. Se invece viene effettuata la differenza, l'immagine in output avrà un range dinamico ed un contrasto minori e saranno esaltati i pixel con valori tali da avere una bassa correlazione tra di loro; quindi non vengono esaltati i pixel più "omogenei", ma solo i punti che presentano una differenza significativa. Proprio la differenza tra l'immagine B (meno recente) e l'immagine A (più recente) metterebbe in risalto quelle aree che prima erano vegetate ed oggi non lo sono più. Ovviamente, queste aree così individuate meritano di essere ulteriormente indagate perché potrebbe essere anche il risultato di incendi o di cambi di coltura etc.

5.11 INFRAROSSO TERMICO

Le immagini "termiche" sono generalmente a risoluzione più bassa delle ottiche riflesse, ma possono tuttavia consentire di ottenere informazioni importanti. Analizzare il segnale nell'infrarosso termico ha una sua valenza poiché gli ambiti urbani (indicati anche come isole di calore), grazie alle caratteristiche dei materiali da costruzione, presentano degli

alti valori nel termico che ci permettono di discriminarli. Un'opportuna individuazione dei pixel con valori elevati nel termico, ad esempio determinati attraverso uno scatterogramma, ci può consentire una buona classificazione. Ulteriore opportunità potrebbe essere quella di effettuare delle misure nell'infrarosso termico in periodi invernali per 'sfruttare' la funzione dei riscaldamenti e per avere un buon contrasto con l'ambiente. In questo caso la banda 6 del Landsat assume notevole importanza. I sensori multispettrali in grado di rilevare l'energia elettromagnetica nella gamma termica, misurando di fatto la temperatura della superficie degli oggetti osservati, vengono chiamati termografi. Le immagini generate evidenziano correttamente le differenze di temperatura sulla scena in esame.



Fig. 35 Immagini Landsat in RGB (321) e in toni di grigio (banda 6); immagine a destra: le parti scure rappresentano zone relativamente fredde, mentre le parti chiare rappresentano le zone più calde.

Le tecniche sopra esposte, ovviamente, possono essere complementari ed una può essere da input per l'altra.

Attualmente uno dei metodi utilizzati per individuare le aree urbane si basa sull'utilizzo di sensori (prima militari) che lavorano nel visibile di notte e identificano le città in base alle luci.

5.12 PARAMETRI ACCURATEZZA

La valutazione sull'efficacia di un algoritmo di classificazione viene fatta considerando tanti aspetti, uno dei quali è sicuramente la visualizzazione della mappa in output, l'interrogazione del dato, ossia una prima analisi che viene fatta immediatamente in un desktop GIS. Oltre a questo per valutare l'efficacia di un algoritmo di classificazione si ricorre alla verifica dei dati sull'accuratezza. Per accuratezza si intende la valutazione quantitativa dei pixel correttamente assegnati alle corrispondenti classi al suolo.

Un criterio generalmente impiegato per la stima dell'accuratezza è basato sul confronto fra i dati di riferimento a terra (test), individuati indipendentemente da quelli utilizzati per classificare (training), e i dati classificati.

Questo metodo si basa sulla “matrice di confusione” (Congalton et al., 1983; Story et al., 1986; Congalton, 1988) in cui nelle righe e nelle colonne ci sono il numero di classi in cui sono stati suddivisi gli oggetti individuati dal classificatore e quelli dalla osservazione diretta. In pratica gli elementi della matrice sono costituiti dal numero di pixel che una procedura (classificazione o osservazione diretta) assegna ad una determinata classe: sulla diagonale principale ci sono i pixel assegnati simultaneamente alla stessa classe da entrambe le procedure e che quindi sono corretti; quelli al di fuori della diagonale sono considerati errori. Il calcolo della matrice di confusione viene effettuato su un numero limitato di pixel e non su tutta l'immagine altrimenti questo richiederebbe paradossalmente la conoscenza della verità a terra di tutta l'area d'esame. Dalla matrice di confusione è poi possibile ottenere l'accuratezza totale (Overall Accuracy) che rappresenta un parametro che indica il numero di pixel correttamente classificati (cioè la somma delle celle diagonali nella matrice di confusione) diviso per il numero totale di pixel analizzati:

$$O.A. = 1/N \sum_{i=1}^r X_{ii}$$

in cui X_{ii} è il numero di pixel nella riga i e colonna i (diagonale), parametro che viene generalmente espresso in percentuale (con r = numero di righe e colonne della matrice quadrata).

Riferendoci invece alle singole classi, è possibile ottenere attraverso la matrice di confusione altri parametri come gli errori di commissione. Gli errori di commissione si hanno quando sono inclusi pixel di classi diverse nella stessa categoria; gli errori di omissione invece si hanno quando un pixel appartenente ad una classe non vi è stato inserito.

Altri parametri utili sono la Producer Accuracy (numero di pixel correttamente classificati come classe X) / (numero totale di pixel appartenenti alla classe X) e la User Accuracy (numero di pixel correttamente classificati come classe X) / (numero di pixel classificati come classe X).

Un altro indicatore utile per la stima dell'accuratezza è il coefficiente di concordanza Khat di Cohen o coefficiente Kappa (Congalton et al. 1983; Congalton, 1991), denominato anche Kappa Statistics Index. Il coefficiente K tiene conto di quella parte corretta di classificazione dovuta al caso ossia confronta l'errore generato dalla classificazione ottenuta con quello di una classificazione eseguita in modo completamente casuale.

Il valore del coefficiente Kappa può oscillare tra i valori 0 e 1; valori bassi indicano una rispondenza nulla fra i dati sicuri e quelli classificati, al contrario valori alti descrivono una corrispondenza buona fra i dati sicuri e quelli classificati. Generalmente si considerano valori superiori o pari a 0.75 da eccellenti a buoni, mentre risultati minori o pari a 0.4 vengono considerati scarsi.

Il Kappa Index è sovente usato per confrontare i risultati di classificazioni con algoritmi e metodologie differenti; per un confronto affidabile è tuttavia opportuno comparare classificazioni con classi omogenee.

La formula per il calcolo del coefficiente K è la seguente:

$$K_{\text{hat}} = \frac{\{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{icol} * X_{iriga})\}}{\{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{icol} * X_{iriga})\}}$$

dove N è il numero di pixel di tutte le classi della verità a terra, X_{ii} rappresenta i pixel sulla diagonale nella matrice, X_{icol} e X_{iriga} rappresentano i totali di riga e colonna per ogni classe (con r= numero di righe e colonne della matrice quadrata).

		realità a terra					
classificato		A	B	C	TOT	user's accuracy	errore di commissione
	A	29	3	4	36	80,56%	19,44%
	B	4	20	0	24	83,33%	83,33%
	C	3	0	14	17	82,35%	82,35%
	TOT	36	23	18	77		
	producer's accuracy	80,56%	86,96%	77,78%			

Tab. 7 esempio di matrice di confusione; overall accuracy 81,82% e coefficiente k 71,44%

5.13 L'USO INTEGRATO DEL GIS

Nei contesti in cui le dinamiche territoriali sono perlopiù puntuali, le tecniche proposte per il monitoraggio dell'espansione urbana di grandi aree perdono di efficacia. In opposizione, un uso integrato di più strati informativi come tra un'immagine satellitare ed una cartografia aerofotogrammetrica acquisiscono una maggiore validità. Considerando queste caratteristiche e la multitemporalità del dato, le immagini satellitari si propongono come valide alternative alle foto aeree o complementari alle stesse. Difatti è possibile effettuare un monitoraggio dei suoli con ripetibilità per controllare modifiche dell'uso e/o dell'urbanizzazione. Grazie alla banda nel vicino infrarosso (NIR) e ad operazioni effettuate su immagini sfalsate nel tempo anche qui si possono evidenziare le zone vegetate e analizzare le aree che prima lo erano e oggi non più.

Per l'individuazione degli abusivismi edilizi, l'utilizzo integrato del GIS assume, come detto in precedenza, più efficacia nel processo. Difatti, contestualizzando il problema nel sistema insediativo, sarebbe abbastanza facile combattere il fenomeno delle costruzioni "nate" irregolarmente.

Un esempio pratico: applicare una classificazione supervisionata con immagini ad alta risoluzione (ad esempio IKONOS) per individuare la classe "edifici". Sogliare il risultato e filtrare solo la classe dell'edificato e sovrapporre questa mappa ad una ortofoto e alla mappa del Piano Regolatore Generale. Gli edifici "sospetti" al di fuori delle aree delimitate dal piano potrebbero essere così rilevati.

Inoltre, analizzando il problema dei condoni edilizi, la possibilità di disporre di immagini di archivio, consentirebbe di verificare quali edifici erano già presenti in diverse date.

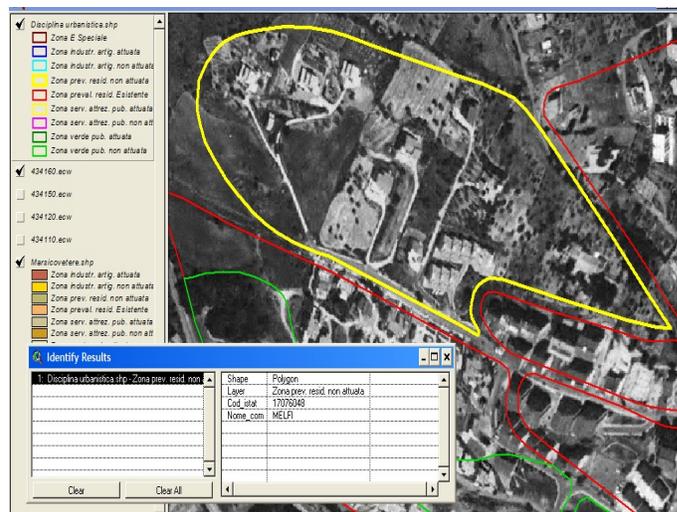


Fig. 36 Esempio di verifica a video. Ortofoto con PRG

5.14 LE CARATTERISTICHE DEI DATI

I dati utilizzati nei Sistemi Informativi Territoriali fanno parte di un database geografico e vengono gestiti con funzioni di database management, di visualizzazione e di analisi dei dati georeferenziati.

Come è noto i dati “tipici” utilizzati nei sistemi informativi geografici possono essere di tipo tabellare, raster e vettoriale. Il dato raster contiene le informazioni in una copertura della regione da rappresentare mediante celle elementari (pixels; si parla di voxels invece, ovvero VOlumetric piXELS, nel caso delle tre dimensioni) ad ognuna delle quali è assegnato il valore dell’attributo corrispondente al tematismo. In formato numerico, una mappa raster può essere vista come una matrice in cui ad ogni elemento corrisponde una locazione spaziale.

Un dato vettoriale invece rappresenta le entità del tematismo attraverso le tre primitive geografiche (punti, linee o poligoni).

I dati tabellari possono essere associati alle entità rappresentate nelle mappe, costituendo in questo caso gli attributi degli oggetti, oppure essere dati che non si riferiscono direttamente ad entità georeferenziate, ma costituiscono un elemento dell’informazione geografica “esterna”.

Considerando lo sviluppo dei sistemi GIS e le caratteristiche dei dati, oggi esistono già le possibilità di operare un numero molto elevato di analisi ed elaborazioni all’interno di pacchetti GIS unitari.

All’inizio della storia dei sistemi informativi geografici il GIS rappresentava uno strumento di “sintesi cartografica” e le funzioni spaziali utilizzate erano principalmente l’overlay di tematismi, query, calcolo delle distanze. Attualmente invece i modelli implementabili in un GIS sono sempre più sofisticati e performanti.

Attraverso le proprietà dei fenomeni territoriali si possono studiare le relazioni spaziali degli oggetti come la contiguità, la connessione, la distanza, la relazione causale o statistica etc.

5.14.1 CAD E GIS

“Il problema dell’interoperabilità tra GIS e CAD negli ultimi 15 anni è stato al centro delle lamentele di molti addetti ai lavori. Secondo una recente stima sembra che

l'inefficienza dovuta al necessario trasferimento di informazioni da un sistema all'altro, sia la causa della perdita di 15 miliardi di dollari all'anno.”¹⁷.

5.14.1.1 LA CARTOGRAFIA NUMERICA VETTORIALE

Sul finire degli anni '70 si sviluppa la cartografia automatica, cioè un insieme di procedimenti operativi di ausilio alla produzione cartografica con l'inizio del tracciamento automatico delle mappe mediante plotter (in sostituzione della fase manuale del disegno). La cartografia automatica è una semplice traduzione in ambiente numerico della cartografia tradizionale; gli elementi cartografici sono gestiti in termini di coordinate (solo planimetriche) ma non vengono considerati problemi di strutturazione dei dati, di codifiche, ecc. Con lo sviluppo dell'Information Technology sono stati messi a punto diversi metodi per gestire svariate tipologie di dati alfanumerici e per risolvere problemi complessi. A tal proposito la cartografia numerica vettoriale ha avuto una notevole espansione con lo sviluppo dei sistemi CAD; i CAD (Computer Aided Design) sono strumenti che forniscono i metodi e gli strumenti informatici che consentono di automatizzare il processo di progettazione attraverso il disegno delle singole componenti che costituiscono un prodotto e delle loro correlazioni, potendone poi gestire l'aggiornamento, la riproduzione e l'archiviazione. L'evoluzione dei GIS per molti anni si è sviluppata parallelamente ai programmi per automatizzare i metodi della produzione cartografica e attualmente il loro sviluppo è così avanzato che alcuni autori ormai considerano la computer cartography (ovvero la “cartografia numerica”) solo come una branca delle tecniche GIS. L'utilizzazione dei sistemi informativi geografici incrementa la richiesta di cartografia in formati digitali e le cartografie richieste sono dei generi più vari: topografiche, geologiche, carte d'uso del suolo ecc. Le possibilità offerte dai software, connesse con le prestazioni degli elaboratori di ultima generazione, rendono possibile la realizzazione di cartografie tematiche derivate con procedure automatiche o più spesso semiautomatiche.

¹⁷ Styli Camateros, vice presidente di Bentley Systems responsabile del settore geospatial, “BE Conference Europe 2006.

La cartografia numerica all'interno di un SIT costituisce il riferimento spaziale per tutta una serie di informazioni sia di tipo strettamente cartografico sia di tipo descrittivo. Per poter assolvere questa funzione essa viene opportunamente "modellata" e "strutturata" secondo criteri che dipendono dal suo impiego prevalente. La tendenza degli utenti GIS è quella di investire risorse nella realizzazione (o nel recupero) di una cartografia numerica finalizzata a soddisfare le proprie specifiche esigenze. L'interesse nei confronti della cartografia numerica è in continuo aumento proprio per il fatto che la sua struttura dati permette di "dialogare" facilmente e in modo automatico con dati provenienti da altri ambiti, anche se nasce il problema della compatibilità dei dati fra ambienti differenti.

5.14.1.2 GIS VS CAD

I GIS rispetto ai sistemi di cartografia numerica più tradizionale consentono l'associazione ad elementi geometrici, rappresentativi di oggetti o aree sul territorio, di un numero infinito di attributi ed informazioni di vario genere (dati alfanumerici, testi, foto, disegni, ecc.). Le forme di base per rappresentare gli oggetti ed i fenomeni del mondo reale all'interno di un database geografico sono rispettivamente:

- quella vector, che utilizza le primitive geometriche (o grafiche) punto, linea e poligono per rappresentare forma e posizione dell'oggetto;
- quella raster, che utilizza la primitiva geometrica pixel, definita come la minima unità di informazione all'interno di una griglia di elementi rappresentanti una carta, una immagine o la distribuzione di un fenomeno.

Le primitive grafiche che rappresentano, singolarmente o combinate, gli oggetti e/o i fenomeni presenti sul territorio forniscono una rappresentazione schematica (come può essere una linea che segue l'andamento della battigia o un punto che individua un edificio). Naturalmente la rappresentazione è strettamente correlata al livello di dettaglio occorrente e al fattore di scala col quale si opera. I GIS differiscono sia dai sistemi di grafica computerizzata che dai sistemi CAD. I sistemi dedicati alla grafica computerizzata non consentono analisi sulla componente non spaziale dei dati geografici.

I sistemi CAD, pur consentendo il trattamento sia della componente non spaziale dei dati geografici che delle relazioni topologiche, non consentono né il trattamento di una quantità o diversità dei dati né le analisi spaziali. I sistemi informativi geografici si distinguono, quindi, dai sistemi sopra esposti in quanto poggiano su ampie basi di dati (database) relazionati, offrendo la possibilità di integrare tra di loro le informazioni, di eseguire operazioni di analisi spaziale quali la ricerca di informazioni nello spazio, le operazioni di sovrapposizione di strati informativi diversi, ecc.

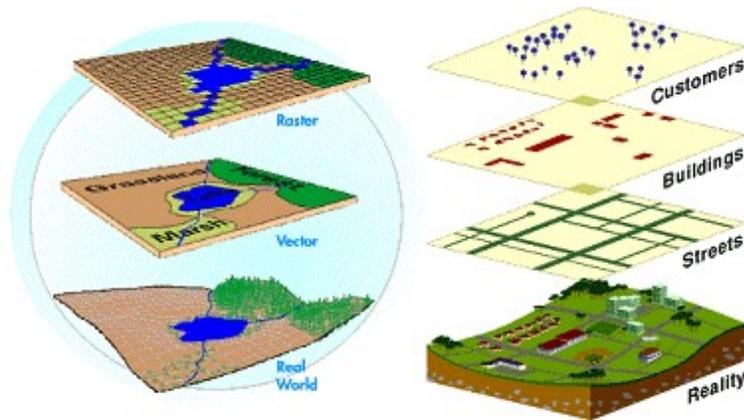


Fig. 37 Esempio di sovrapposizioni di diversi strati informativi

Un sistema CAD è spesso utilizzato per produrre cartografia digitale. Scopo del CAD, essendo indirizzato essenzialmente alla stampa, è la rappresentazione e la visualizzazione di oggetti. Il GIS invece ha nella visualizzazione solo uno degli obiettivi preposti. Ad esempio, un edificio in un CAD potrebbe essere rappresentato da quattro o più linee, ma in un GIS (a meno di particolari applicazioni) un fabbricato viene rappresentato come un poligono (che ha un attributo importante che è l'area).

Inoltre, in un sistema GIS tutti i dati inseriti possono essere oggetto di interrogazione (in genere chiamate Query). Da un insieme di dati è possibile estrarne un sottoinsieme che corrisponde al risultato dell'interrogazione effettuata. Il risultato può essere oggetto di

ulteriori richieste (es. visualizzazione in mappa, statistiche, grafici, nuova cartografia tematica, ecc.).

Approfondire le caratteristiche principali dei due sistemi è fondamentale poiché in tanti casi di analisi, se non in tutti, è necessaria una forte integrazione dei dati prodotti con le due diverse tecnologie. La scarsa conoscenza del GIS porta ancor oggi a produzioni di cartografie CAD completamente distaccate da quella che è l'impostazione metodologica di un sistema informativo territoriale. La disomogeneità del trattamento dei dati originali e le differenti metodologie e strumentazioni utilizzate in questi processi, rendono critica la problematica della qualità del dato, ponendo l'accento sull'importanza della ricerca di procedure standard per quantificare questi valori. Ma, a parte le problematiche CAD-GIS (che sono affrontate in seguito), il discorso da affrontare è più generico; ogni dato nasce per essere trattato ed elaborato. La sua costruzione non deve essere basata solo su un momentaneo utilizzo dell'informazione, ma deve necessariamente essere proiettata verso utilizzi successivi. La costruzione del dato deve essere pensata e ragionata per permettere allo stesso di essere 'leggibile' e fruibile. Ad esempio, non è raro disporre di cartografie digitali con diverse sigle, che identificano i vari layer, sprovviste di legenda. A tal proposito la realizzazione del metadato, che possiamo definire come la carta di identità del dato, è ancora molto carente. Questa nuova visione nel trattamento dei dati comporta l'adozione di un nuovo modello di lavoro che deve essere orientato verso scenari futuri.

5.14.1.3 IL PASSAGGIO DAL CAD AL GIS

Considerando l'importanza e l'utilizzo massiccio di cartografia vettoriale derivante da sistemi CAD (solitamente files .dxf o .dwg) è necessario affrontare i problemi che insorgono quando si passa da un ambiente all'altro, oltre al problema, ancor precedente, legato alle limitazioni d'uso dovute al formato proprietario del dato .dxf o .dwg.

Uno degli ostacoli maggiori, nel passaggio dal CAD al GIS, è caratterizzato dai problemi topologici e di costruzione della cartografia. Negli ultimi anni, c'è stato un miglioramento nella produzione di cartografie e della gestione delle stesse in ambiente GIS. La ricerca di maggior interoperabilità ed una maggiore "capacità" dei software GIS di gestire e

modificare la cartografia CAD, rendono l'integrazione di un sistema con l'altro sempre più efficiente. Tuttavia, rimangono due sistemi diversi che nascono per gestire elaborazioni e dati diversi e non è affatto raro trovare ancor oggi cartografie vettoriali che rendono indispensabili correzioni.

Nelle fasi iniziali di un lavoro è frequente che l'operazione che si rivela più onerosa (sia in termini di tempo, sia di risorse) sia la predisposizione delle basi dati cartografiche e alfanumeriche. A volte è dunque necessario correggere i dati digitalizzati importati da altri formati di file o derivati da carte geotopografiche disegnate in modo impreciso. Le imprecisioni di questi dati possono essere dovute ad errori di rilevamento topografico, di digitalizzazione o scansione. I problemi più rilevanti scaturiscono nella fase di manipolazione dei dati vettoriali che, nella maggior parte dei casi, vengono prodotti senza valutare bene le possibili utilizzazioni future. Inoltre, caso peggiore può essere quello di una cartografia vettoriale che è stata malamente manipolata. Apparentemente il processo di correzione risulta molto semplice ma i problemi connessi al passaggio dall'ambiente CAD al GIS possono essere molteplici. Al fine di predisporre un database topografico, in una cartografia vettoriale di base devono essere prima individuati gli errori presenti per poi attuarne la correzione; in seguito vengono elencati e descritti le tipologie di errori più comuni:

- le “classiche” polilinee non chiuse che, non avendo l'attributo areale, non rendono automatico il riconoscimento del poligono
- interpretazione delle codifiche dei layer che, a volte, non hanno legenda
- i retini, e a volte anche testo o altro, posti sullo stesso layer
- intersezioni di linee deficienti o eccedenti
- mancanza di georeferenziazione delle cartografie digitali
- esplosioni di entità grafiche
- la presenza di entità grafiche duplicate ecc..

5.14.2 DATI E CARTOGRAFICI E TELERILEVATI

L'analisi spaziale, in senso puro, è molto forte in ambiente GIS e meno nel campo del telerilevamento. Ovviamente questo dipende sia dalle caratteristiche dei dati che dalla gestione delle informazioni nei due ambienti che è diversa. In ogni modo, l'integrazione può seguire diversi percorsi metodologici che vanno da pratiche applicazioni basate sui valori numerici dei dati, alla interpretazione concettuale degli stessi, alle relazioni spaziali tra gli oggetti rappresentati. Pertanto le soluzioni proposte devono essere orientate ad assicurare operatività tra le diverse piattaforme software anche attraverso banche dati ibride. In questa concezione di integrazione, basata su dati ibridi (inizio del data fusion), si possono realizzare algoritmi e soluzioni funzionanti sotto il piano operativo, ma che tuttavia non sono sufficienti a coprire le numerose eterogeneità e gli algoritmi in quanto spesso non sono in grado di trattare informazioni di tipo spaziale.

Le tecnologie su cui si basano gli strumenti informatici per i GIS e Remote Sensing, si concentrano solo sui dati geografici e, pertanto come tali, sono stati progettati e sviluppati per la rappresentazione delle caratteristiche geografiche nel modo più affidabile e più realistico possibile entro i vincoli delle regole cartografiche. La rappresentazione cartografica è l'unico elemento per il confronto diretto tra queste due tecnologie. Infatti, tecnicamente e concettualmente, le due tecnologie si fondano su principi divergenti. Il Remote Sensing è prevalentemente una tecnologia di creazione di dati, mentre il GIS è orientato soprattutto alla loro raccolta e trattamento.

Il telerilevamento ha come obiettivo primario la restituzione del dato attraverso un'immagine raster con diverse lunghezze d'onda registrate dal sensore. E' ovviamente una restituzione continua dei dati sul territorio sotto forma di pixel ma che comporta una assenza di regole topologiche.

Questo ci pone dei limiti e le informazioni tematiche che possono essere estratte possono avere limiti di accuratezza sia tematicamente che spazialmente.

Diversamente i dati “puramente” GIS possono essere trattati in moltissimi casi nel modello vettoriale, e pertanto, le entità rappresentate sono distinte e caratterizzate da una topologia ben strutturata e definita da relazioni implicite. Sono dati comunque discreti e non continui sia spazialmente che tematicamente.

Parlando di “cartografia di base”, l'origine può essere derivante da mappe di riferimento, rilievi diretti, telerilevamento (le mappe aerofotogrammetriche sono ancora oggi diffusissime in tal senso).

Proprio il telerilevamento sta portando delle novità in tal senso ed è sicuramente importante la risoluzione spaziale dei dati telerilevati che oggi può giungere anche fino a 60 cm al suolo. Attualmente anche per lo studio delle dinamiche a scala urbana si fa sempre più uso di immagini telerilevate multispettrali.

Quindi l'evoluzione dei due sistemi e dei dati derivati dagli stessi ci mette oggi in condizione di poter affrontare l'integrazione molto più efficacemente rispetto a qualche anno fa.

Fino ad ora le modalità di interazione possono essere rappresentate secondo tre metodologie differenti:

1. Remote Sensing utilizzato per raccogliere dati per il popolamento dei database GIS. Ciò include tutte le operazioni di aggiornamento e di ricognizione delle coperture tematiche, utilizzando prodotti ottenuti da piattaforme aeree o satellitari, interferometriche e LIDAR;
2. Dati GIS utilizzati come dati ancillari per l'elaborazione dei dati telerilevati. Sono state messe appunto diverse tecniche, utilizzate nella fase di addestramento dei modelli supervisionati, che utilizzano gli attributi contenuti nelle geometrie dei dati GIS per la selezione dei campioni per le zone di addestramento, o per la definizione delle funzioni di discriminazione o ponderazione dei modelli di classificazione;
3. Combinazione delle funzioni analitiche. Queste includono le query di base spaziale, le operazioni di overlay, la selezione di attributi specifici per le analisi statistiche e tematiche, sia dai dati GIS che dai dati telerilevati, con l'utilizzo della

logica fuzzy e booleana, al fine di costruire un sistema esperto per la interpretazione delle immagini.

Alcuni autori, per raggiungere l'obiettivo finale nella integrazione tra GIS e Telerilevamento, hanno proposto di concentrarsi sul grado di interazione tra i modelli di dati, nell'individuare il livello al quale deve esserci lo scambio e/o l'interazione, nel perseguimento di una adeguata metodologia per la registrazione geometrica delle entità.

Attualmente una via di comunicazione disponibile è data dalle molte possibilità di conversione di formato dei dati (anche procedure di rasterizzazione e di vettorializzazione).

L'integrazione totale, anche se teoricamente possibile, è ancora lontana.

5.14.3 DATA FUSION

Per combinare le due tipologie di formati è necessario "connettere" i dati forniti da entrambe le tecnologie in modo più razionale possibile. Le tecnologie che gestiscono l'informazione territoriale devono essere coniugate per sostenere una ricerca di una serie di fenomeni spaziali.

E' ampiamente riconosciuto che per problemi complessi non possono sussistere tecnologie isolate ma è opportuno completare il quadro dei dati di studio, con le diverse specificità, attingendo da più settori. La loro integrazione spesso segue uno schema in cui il gestore dei dati, rappresentato dal GIS, ha un ruolo basilare. Il concetto di integrazione naturalmente non può prescindere dai dati ibridi (data fusion). Il data fusion rappresenta sicuramente un grande potenziale ma esistono anche delle limitazioni. Dal punto di vista applicativo ciò che impedisce un adeguato ed efficace data fusion può riassumersi in tre grandi problematiche relative a (Mesev, 2008):

- mancanza di standard coerenti;
- carente definizione dell'incertezza;

- incoerenze di scala, legenda e differente natura dei dati.

A tal proposito, una questione importante da trattare è relativa agli standard sui dati. In ambito GIS molti organismi nazionali ed internazionali stanno intraprendendo iniziative in tal senso a partire dagli standard OGC (Open Geospatial Consortium). L'Open Geospatial Consortium è un consorzio internazionale di imprese con oltre 350 membri provenienti dal mondo dell'industria, della pubblica amministrazione, del settore privato, Università e Ricerca. Obiettivo primario di OGC è lo sviluppo, la promozione e l'armonizzazione globale di standard aperti e architetture, integrazione di dati spaziali e servizi per le applicazioni utente.

C'è da dire però che i dati spaziali in formati proprietari e non interoperabili oggi sono ancora diffusissimi. I formati continuano ad essere ancora troppo legati alle questioni tecniche e alle specifiche dei software con i quali vengono gestiti. Le software house si preoccupano solo in parte di risolvere in parte il problema della interoperabilità tra i diversi formati di dati. La risoluzione di problemi va comunque vista ampiamente sia a livello del dato che a livello della fonte dello stesso. Per esempio, non ci dovrebbe essere differenza nel trattare un dato nazionale piuttosto che internazionale. La necessità di armonizzare gli standard, infatti, è affrontata dall'Unione Europea che ha istituito un'iniziativa volta a creare una infrastruttura per lo scambio della informazione territoriale - Infrastructure for Spatial Information in Europe (INSPIRE). L'obiettivo è quello di garantire un maggiore accesso alle informazioni geografiche mediante l'armonizzazione dei dati territoriali secondo specifiche dettagliate. Il recepimento in Italia della direttiva INSPIRE purtroppo stenta a decollare e non è ben chiaro se sarà completamente allineata a quella europea oppure no.

INSPIRE in ogni caso non darà tutte le risposte ai problemi di integrazione dei dati sopra esposti ma rappresenta sicuramente un forte punto di riferimento.

Spostandoci sui dati del Remote Sensing la ricerca di uno standard unico è ancora più problematica. In questo caso i satelliti (se non il sensore) producono un proprio formato di dati, che richiedono nuove routine di input per il loro utilizzo nei software.

La speranza della comunità scientifica è che una norma generale possa finalmente nascere.

5.14.4 INTEGRARE I DATI

I vantaggi che si potrebbero ottenere integrando i dati sono evidenti ma di pari passo ci sono anche da considerare i problemi legati alla precisione, gli errori e l'accuratezza, che all'interno di questo processo di integrazione devono essere correttamente affrontati. Un approccio che possa dirsi scientifico richiede una definizione di accuratezza con la quale l'affidabilità del risultato possa essere compresa e comunicata.

Il termine incertezza, che copre una gamma più ampia di dubbio o di incoerenza, si deve intendere come una componente dell'errore, e non va confusa con esso. E' chiaro che conoscere l'incertezza ci permette di avere un maggior controllo sui risultati.

Tuttavia, almeno in ambito GIS, prima di "intrecciare" dei dati di diverse origini è necessario analizzarli uno a uno e trovare delle forme di integrazione corrette. Difatti gli strumenti a disposizione del tecnico GIS permettono facilmente di combinare, sovrapporre e analizzare i dati provenienti da molte fonti diverse, indipendentemente dalla scala, precisione, risoluzione etc.

Senza la quantificazione della incertezza e le necessarie precauzioni, l'output del processo può essere considerato solo qualitativamente, e ciò svaluta notevolmente il suo significato scientifico e pratico. Tutto si amplifica se si considera la questione di fusione/integrazione tra le tecniche GIS e telerilevamento.

Gli obiettivi che si possono perseguire per tener conto del livello di incertezza nella modellazione geografica possono riassumersi in tre punti:

- definire per ciascun set di dati il livello di incertezza, in modo da valutare l'affidabilità della informazione associata;
- sviluppare metodi che permettano di studiare la propagazione degli errori quando i dati vengono elaborati e trasformati;

- determinare l' idoneità finale dei vari set di dati per le diverse attività

Per quanto riguarda il telerilevamento la comunità scientifica si è concentrata, nel quantificare gli errori che sono associati al trattamento dei dati telerilevati, sulle analisi degli errori nelle procedure di registrazione dei dati e nelle procedure di estrazione di informazione o nelle tecniche di classificazione (Brivio et al.,2004).

Nel campo dei sistemi informativi geografici invece si sono fatti degli sforzi per comprendere come la trasformazione dei dati, nei diversi modelli di spazio geografico, influenzi il livello d'incertezza delle informazioni estraibili.

	Field	Image	Thematic	Object
Data or value	Measurement error and precision	Quantization of value in terms of spectral bands and dynamic range	Labeling uncertainty (classification error)	Identity error (incorrect assignment of object type), object definition uncertainty
Space	Locational error and precision	Registration error, sampling precision	Combination effects when data represented by different spatial properties are combined	Object shape error, topological inconsistency, 'split and merge' errors
Time	Temporal error and precision	(Temporal error and precision are usually negligible for image data)	Combination effects when data representing different times are combined	Combination effects when data representing different times are combined
Consistency	Samples / readings collected or measured in an identical manner	Image is captured identically for each pixel, but medium between satellite and ground is not consistent; inconsistent sensing, light falloff; shadows	Classifier strategies are usually consistent in their treatment of a dataset	Methods for object formation may be consistent, but often are not. Depends on extraction strategy
Completeness	Sampling strategy covers space, time and attribute domains adequately	Image is complete, but parts of ground may be obscured	Completeness depends on the classification strategy. (Is all the dataset classified or are only some classes extracted?)	Depends on extraction strategy. Spatial and topological inconsistencies may arise as a result of object formation

Fig. 38 Tipi di incertezza (Gahegan e Ehlers, 2000).

Lo schema di Gahegan e Ehlers è solo rappresentativo delle possibili diverse tipologie di incertezze. Difatti la gestione dell'incertezza è ancora più problematica da definire per due ambienti comunque diversi (GIS e Remote Sensing) con tipologie di dati differenti e con ambienti software differenti. Oltre l'ovvia differenza tra la struttura dei dati contenenti le informazioni nei due ambienti, spesso il problema del data fusion deve affrontare la necessità di confrontare, nello stesso ambito, dati di diversa tipologia.

Nel campo del telerilevamento un aiuto in tal senso viene dato dal Global Monitoring for Environment and Security (GMES) che è un'iniziativa dell'Agenzia Spaziale Europea e della Commissione Europea creata nel 2001 il cui obiettivo è quello di determinare la capacità all'Unione Europea di agire autonomamente nel settore della sicurezza e

dell'ambiente tramite le rilevazioni satellitari; tra la miriadi di dati satellitari oggi esistenti dell'Agenzia Spaziale Europea si intende selezionare i dati migliori a livello qualitativo e più aggiornati.

L'iniziativa GMES, inoltre, ha definito una serie di indicatori che possono essere il risultato di dati telerilevati. Tra questi indicatori sono anche presenti i temi inerenti l'ambito urbano, le infrastrutture, la copertura del suolo etc.

Nei processi di integrazione dati spesso l'immagine satellitare può far parte della prima parte delle analisi territoriali che poi seguiranno con ulteriori input provenienti da dati puramente GIS. Ad esempio l'individuazione dei tessuti urbani da dati telerilevati può essere successivamente confrontata con la mappa dei vincoli paesaggistici di un piano territoriale a scala vasta. Le soluzioni maggiormente adottate sono proprio quelle che si basano sulla separazione della gestione dei dati. Tuttavia, come detto precedente, il software GRASS GIS ha al suo interno molti tool tipici del telerilevamento.

La prassi più adottata è comunque quella di “tradurre” i dati telerilevati per renderli fruibili in ambiente GIS ma ci può essere anche il caso inverso in cui i dati GIS vengono utilizzati come dati ancillari, per la definizione di alcuni data set di addestramento al fine di ridurre i costi delle indagini sul campo, o per eliminare gli errori di interpretazione dei dati telerilevati (ad esempio, l'utilizzo di una mappa vettoriale sull'uso del suolo ai fini dell'addestramento, previsto nella metodologia supervisionata per la classificazione di dati telerilevati); spesso infatti i tematismi del GIS possono essere molto più accurati dei dati del Remote Sensing .

Le applicazioni più performanti relative al data fusion sono perlopiù basate su map-algebra piuttosto che su analisi vettoriali.

6 IL CASO DI STUDIO

L'area oggetto di studio è il territorio del Barese e della costa Pugliese che negli ultimi decenni ha avuto una forte evoluzione dal punto di vista del sistema insediativo. Si tratta di un'area con un incremento significativo di aree soggette a sprawl urbano-territoriale.

È un territorio che è sottoposto ad uno “stress urbanistico” ed è importante capire quale possa essere lo scenario futuro di questo assetto territoriale. Il sistema insediativo di queste aree presenta una forte dinamicità ed è contraddistinto da grandi aree urbane spesso unite da strisce di territorio urbanizzate. Sono anche presenti però forme di insediamento urbano lungo le coste e in aperta campagna che tendono sempre più a far scomparire gli spazi naturali.

Gli obiettivi del presente lavoro sono quelli di capire le caratteristiche della trasformazione del territorio (con particolare attenzione all'urbanizzato), di valutare il fenomeno della dispersione insediativa e del consumo di suolo.

Alla base di tutto il lavoro c'è la condivisione dei dati geografici e l'integrazione delle tecniche del telerilevamento e del GIS.

6.1 APPLICAZIONE 1: USO DEL DATO LANDSAT PER LO STUDIO DELLE AREE URBANIZZATE

L'applicazione è prevalentemente basata sulla map-algebra usando come base informativa il dato satellitare. I dati Landsat si prestano bene allo scopo per via delle caratteristiche adatte allo studio di un fenomeno temporale che riguarda un territorio abbastanza vasto.

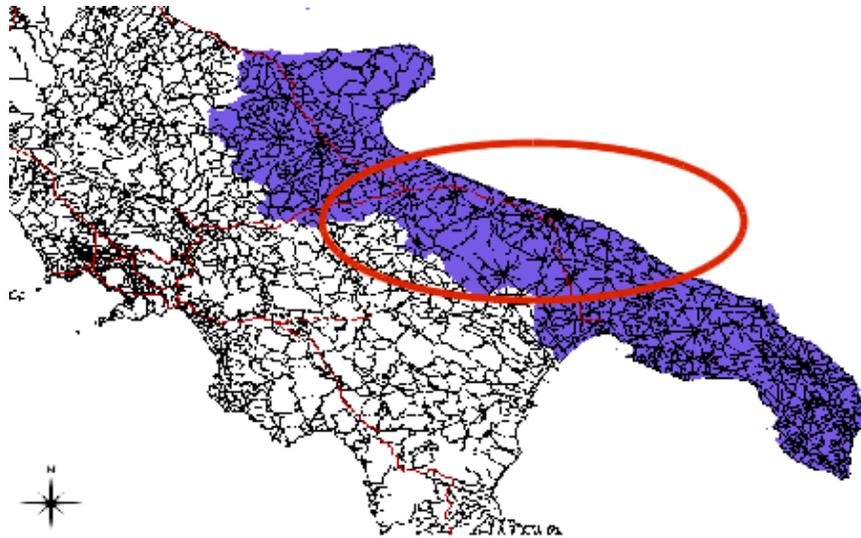


Fig. 39 Area di studio

Per studiare e monitorare l'espansione urbana di grandi territori, ad esempio di un'area metropolitana, la soluzione "Landsat" è appropriata in quanto non necessita una elevata risoluzione geometrica e consente in un'unica immagine di esaminare una porzione d'area vasta. Le bande 1, 2, 3, 4, 5 e 7 sono sensibili all'energia proveniente dal sole riflessa dalla superficie della Terra. Ogni banda è sensibile ad una parte diversa dell'energia solare riflessa. La banda 6 è nel termico (10,40 - 12,50 μm) ed è diversa da tutte le altre in quanto essa non registra l'energia riflessa ma piuttosto la temperatura della superficie della Terra. Oltre a queste bande, il sensore ETM+ ha un'ottava banda, detta banda pancromatica (0,50 - 0,90 μm) sensibile all'energia della luce riflessa in un vasto intervallo di lunghezze d'onda che comprende il blu, il verde, il rosso e l'infrarosso vicino.

Altra caratteristica importante è il folto archivio di immagini landsat che va dagli anni '70 ad oggi. Purtroppo dal 2003 il satellite Landsat 7 ha problemi di acquisizione (SLC-off). Infatti il 31 Maggio 2003 è stato rilevato un malfunzionamento a bordo del Landsat 7 relativo allo Scan Line Corrector (SLC). Il problema è permanente e il Landsat 7

acquisisce in modalità SLC-Off con conseguenti anomalie nelle immagini (dei veri e propri buchi) che risultano più evidenti lungo i margini della scena.

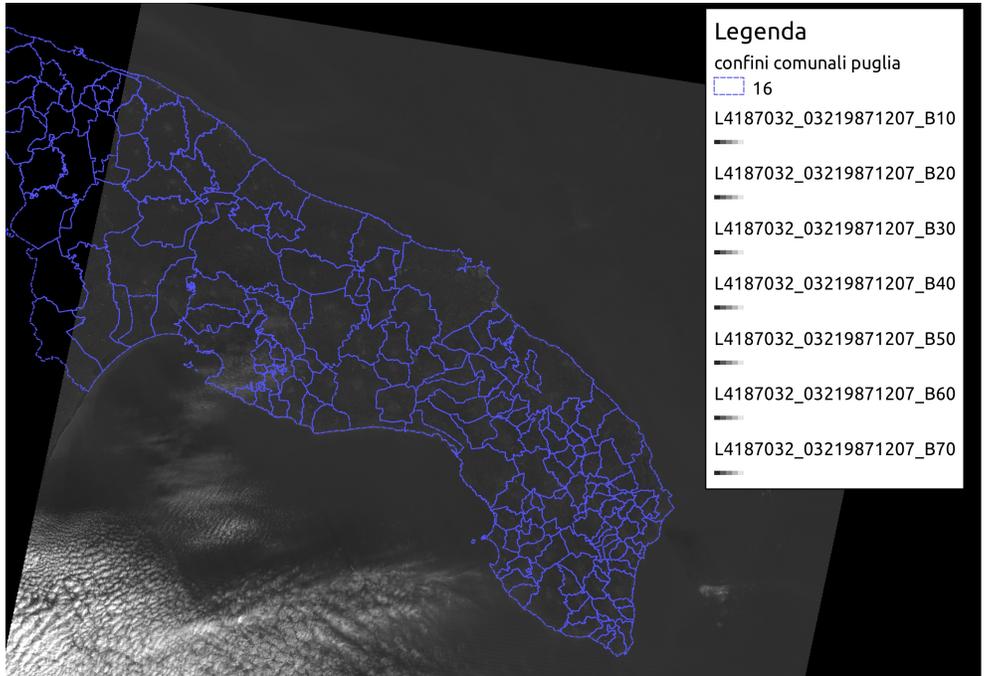


Fig. 40 Immagine landat e relative bande

I dati sono georiferiti nel sistema di riferimento spaziale UTM WGS 84 e sono subito consultabili mediante un qualsiasi desktop GIS. Confrontando le singole bande è importante che abbiano le stesse caratteristiche spettrali. Nella tabella sottostante sono riportate le bande utili a tale scopo: le più idonee sono quelle corrispondenti al verde ed al rosso per le quali è possibile il confronto anche con dati del sensore ASTER (satellite Terra).

	Landsat MSS	Landsat TM	Landsat ETM+	Terra ASTER
Risoluzione	80 m	30 m	30 m	15 m (VNIR)
Verde	1 (0,5-0,6 μm)	2 (0,52-0,6 μm)	2 (0,52-0,6 μm)	1 (0,52-0,6 μm)
Rosso	2 (0,6-0,7 μm)	3 (0,63-0,69 μm)	3 (0,63-0,69 μm)	2 (0,63-0,69 μm)
Vicino infrarosso	3 + 4 (0,7-1,1 μm)	4 (0,76-0,9 μm)	4 (0,76-0,9 μm)	4 (0,78-0,86 μm)

Tab. 8 Comparazione dati

1	Blue-Green	0.45-0.515	30m
2	Green	0.525-0.605	30m
3	Red	0.63-0.690	30m
4	Near IR	0.760-0.900	30m
5	Medium IR	1.550-1.750	30m
6	Thermal	10.40-12.5	60m
7	Medium IR	2.080-2.35	30m

Tab. 9 Caratteristiche bande ETM+

6.1.1 LE IMMAGINI LANDSAT E L'URBANIZZATO

Osservando un'immagine da satellite in RGB, la crescita di una città è caratterizzata dal passaggio dai colori della vegetazione naturale ai colori generalmente più chiari e luminosi dovuti all'alta riflessione delle costruzioni e dei terreni e suoli da cui la vegetazione è stata rimossa.



Fig. 41 RGB Landsat 1999



Fig. 42 RGB Landsat 2009

Per poter ottenere una immagine in RGB è necessario combinare le bande 3,2,1 attraverso il modulo di GRASS denominato `i.landsat.rgb`; `i.landsat.rgb` compie una azione di autobilanciamento e aumenta i canali di colore di una immagine Landsat RGB per

ottenere una miscela di colore più naturale. Il dato resta comunque intatto e viene modificata solo la tabella di colori di ogni banda. Il modulo opera calcolando un istogramma per ogni canale di colore e la rimozione di una quantità regolabile di valori anomali prima di ricalibrare la scala cromatica con il modulo apposito (r.colors). Il tool i.landsat.rgb funziona con qualsiasi set di immagini RGB e lo script è facilmente modificabile per funzionare con altri set di dati e altre bande.

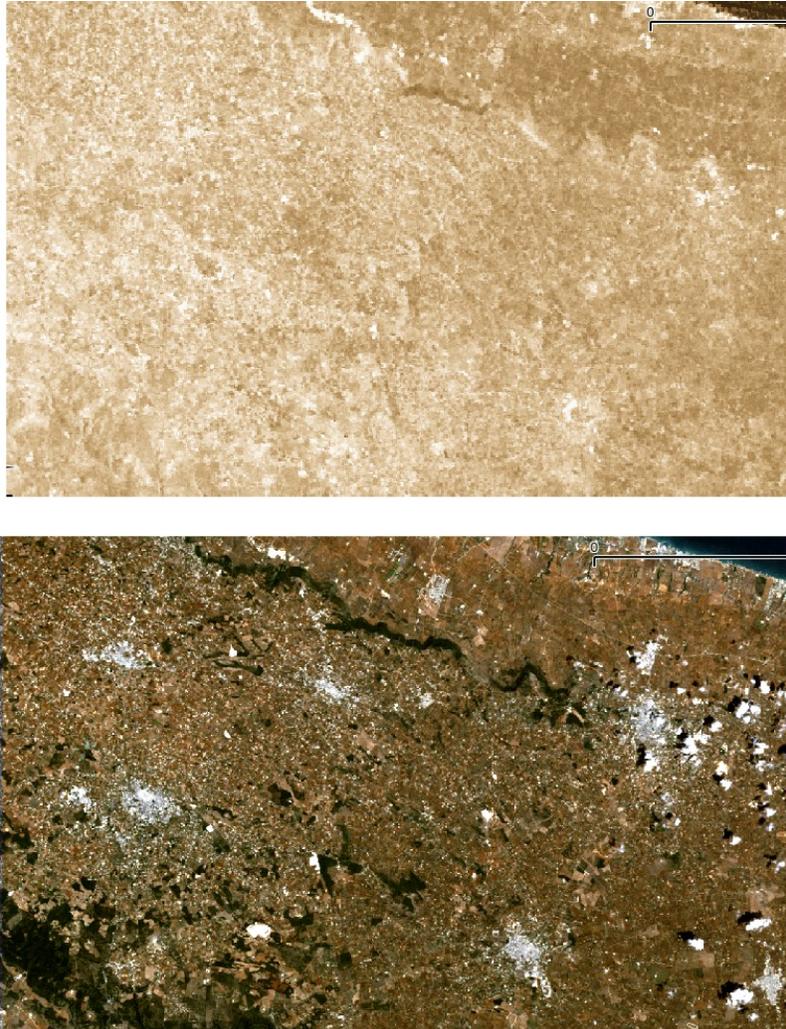


Fig. 43 confronto RGB Landsat 1976 e 2009

Il fenomeno dell'espansione urbana può essere analizzato a varie scale a seconda del contesto insediativo da esaminare. Ovviamente, trattandosi di dinamiche non improvvise,

necessitano immagini della stessa area in periodi diversi, ma la risoluzione spaziale può anche non essere elevata. In ogni caso, le aree urbane possono essere individuate indagando le risposte spettrali delle stesse sia nella banda del visibile che in quella dell'infrarosso. Le costruzioni presentano dei valori più alti nell'infrarosso rispetto al visibile. Un modo per evidenziare i cambiamenti, ma solo su tre immagini per volta, è la composizione in falsi colori.

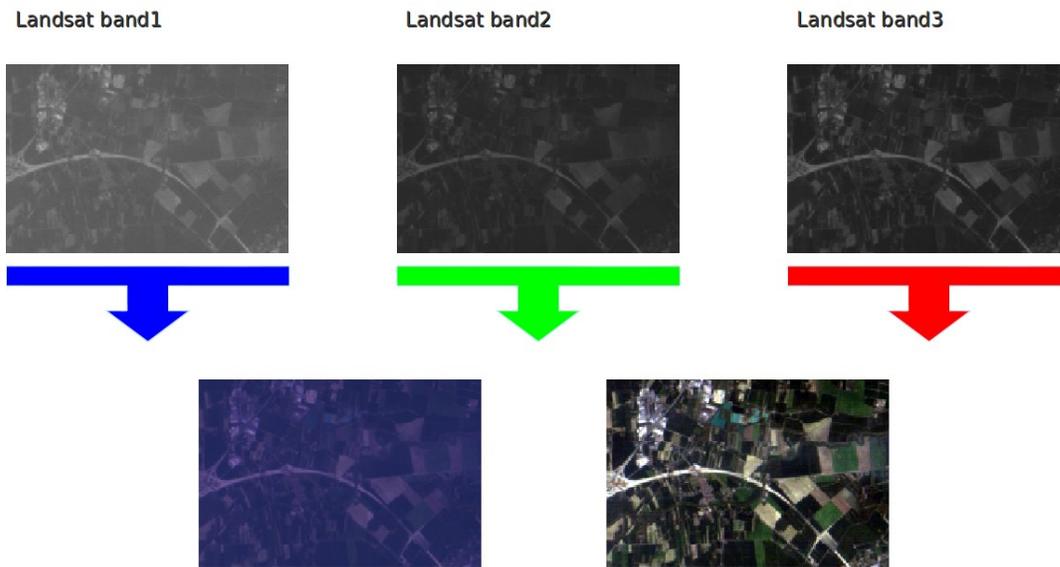


Fig. 44 Vero colore.

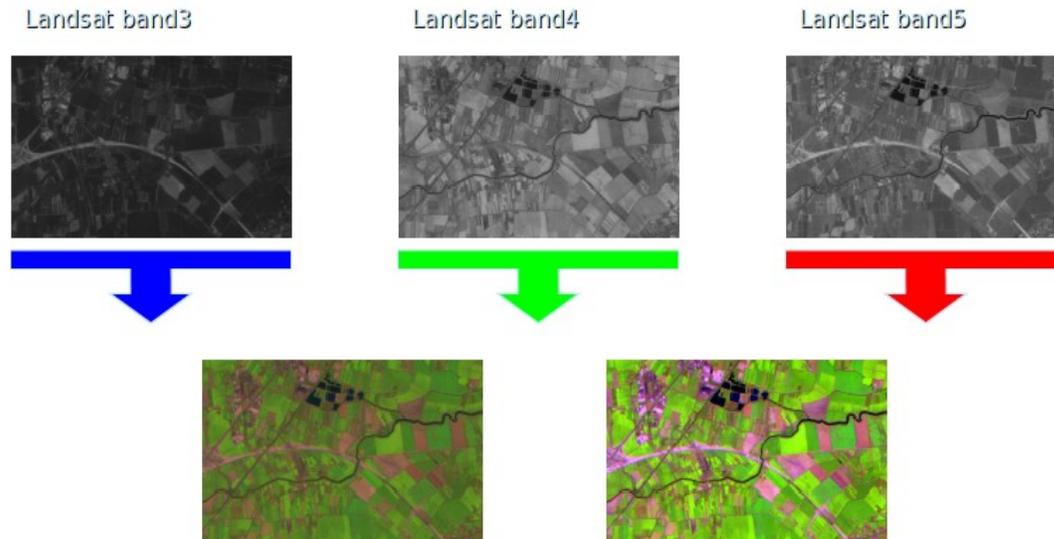


Fig. 45 Falso colore. L'immagine (migliorata con stretching lineare) con colori innaturali.

Un'altra possibilità di combinazione, così come avviene per le immagini multispettrali quando si uniscono più bande con diverso range spettrale, è quella di usare immagini con diversa data di acquisizione (è importante usare bande con le stesse caratteristiche spettrali). Si dovrebbe ottenere un'immagine a colori in cui le aree immutate appaiono con tonalità di grigio (bianco e nero compresi) mentre le zone in cui sono avvenuti cambiamenti mostrano colori più o meno vivaci. Nella immagine seguente sono state combinate le tre bande 2 del 1976, 1999, 2009.

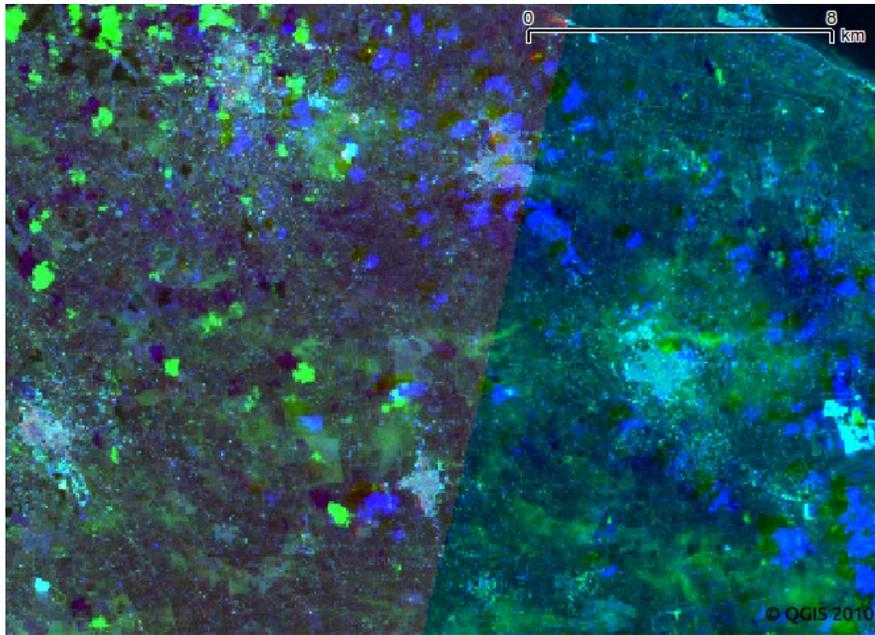


Fig. 46 composizione in falsi colori.

I colori più evidenti mostrano delle variazioni avvenute dal 1976 ad oggi. Purtroppo sono presenti delle nuvole che indicano delle variazioni “errate” ma in alcuni casi (evidenziate dal colore chiaro) è ben evidente l'aumento della superficie urbanizzata avvenuta negli anni.

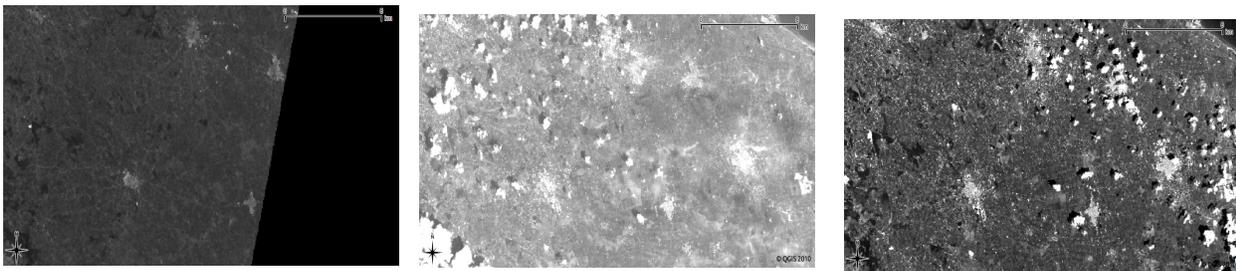


Fig. 47 Confronto banda 2 1976, 1999, 2009

In teoria servirebbero dati calibrati, tuttavia la maggior parte dei software offrono opzioni di stretching automatico che in genere danno buoni risultati; eventualmente si può ritoccare manualmente la curva di frequenza dei valori DN per tarare su toni di grigio le aree stabili.

Se vogliamo evidenziare maggiormente le aree mutate possiamo rendere anche la luminosità dell'immagine proporzionale ai cambiamenti. Per fare questo dobbiamo trasformare l'immagine da RGB a canali HSI. HSI vuol dire Hue, Saturation, Intensity, ossia Tinta (Hue), Saturazione (Saturation), Intensità (Intensity). Dopodiché si converte nuovamente in RGB usando la saturazione anche come intensità (in questo modo si perde l'informazione sulla luminosità media delle aree in esame). Ecco il risultato per l'immagine al 2009.

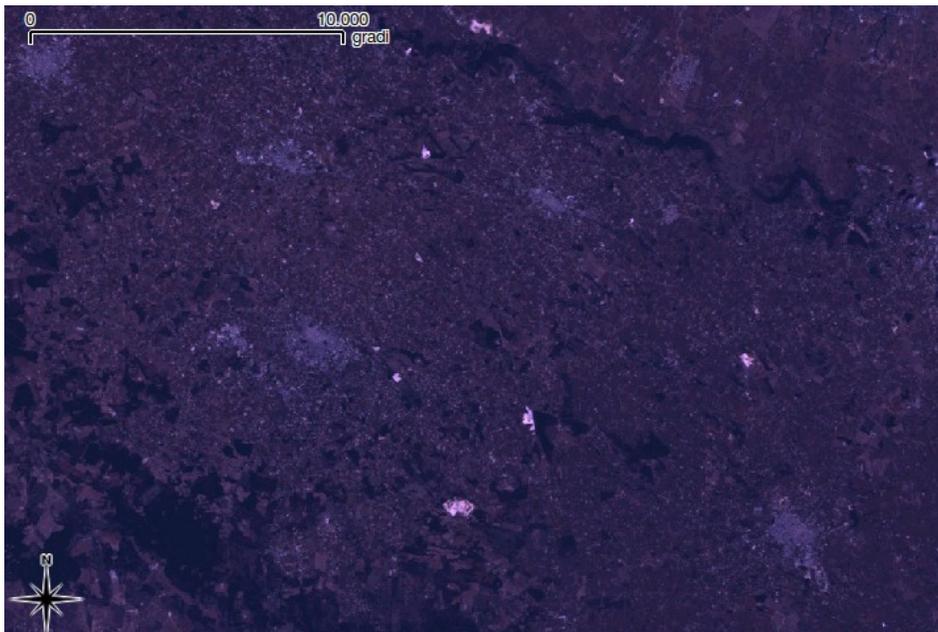


Fig. 48 da RGB a canali HSI (Hue, Saturation, Intensity) e nuovamente in RGB

Quindi attraverso il modulo `i.rgb.his` di GRASS con tre layer in input (rosso, verde e blu) otteniamo in output tre layer raster che rappresentano il colore, l'intensità e la saturazione dei dati. Ogni raster in output è rappresentato attraverso una tabella di colori su scala di grigio. Per passare invece da HIS a RGB si usa il modulo `i.his.rgb`.

Anche l'operazione di composizione in falsi colori è stata realizzata con GRASS ma può essere eseguita con tutti i programmi dedicati al remote-sensing, con molti software GIS

e da alcuni comuni elaboratori di immagine (come Photoshop o The GIMP; in questo caso non si parla di bande ma di *channels* o canali).

Una ulteriore modalità per poter analizzare le evoluzioni delle aree urbanizzate è data dalla combinazione aritmetica delle bande; in questo modo si possono costruire degli indici di telerilevamento adeguati per lo studio di un determinato fenomeno.

La combinazione di bande può quindi dare ulteriori informazioni per lo studio di un fenomeno. Uno degli indici analizzati per lo studio dell'urbanizzato è il BAI - Built-up Areas Index = $(\text{blue} - \text{ir})/(\text{ir} + \text{blue})$. Il BAI è un indice molto utile per individuare le superfici impermeabili, come asfalto e cemento. Per combinare aritmeticamente diversi raster(bande) viene utilizzato il motore di GRASS per la map-algebra denominato r.mapcalc.

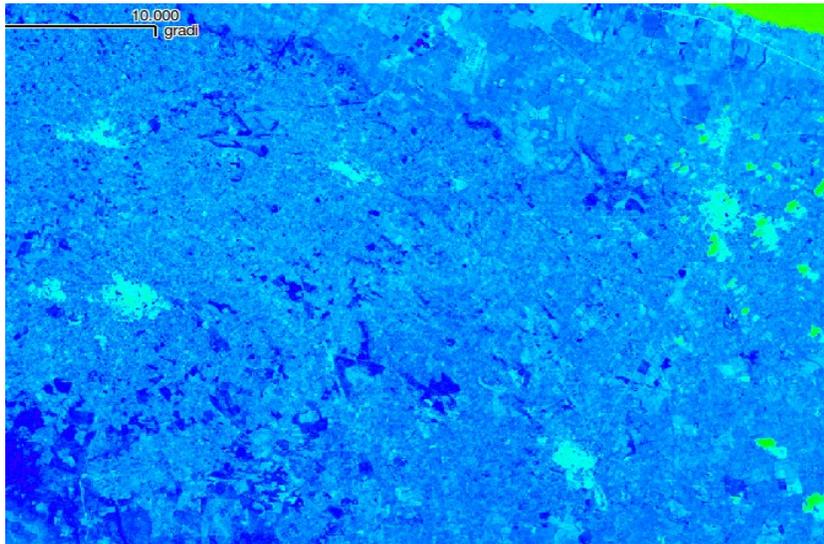


Fig. 49 Built-up Areas Index da Landsat 1976

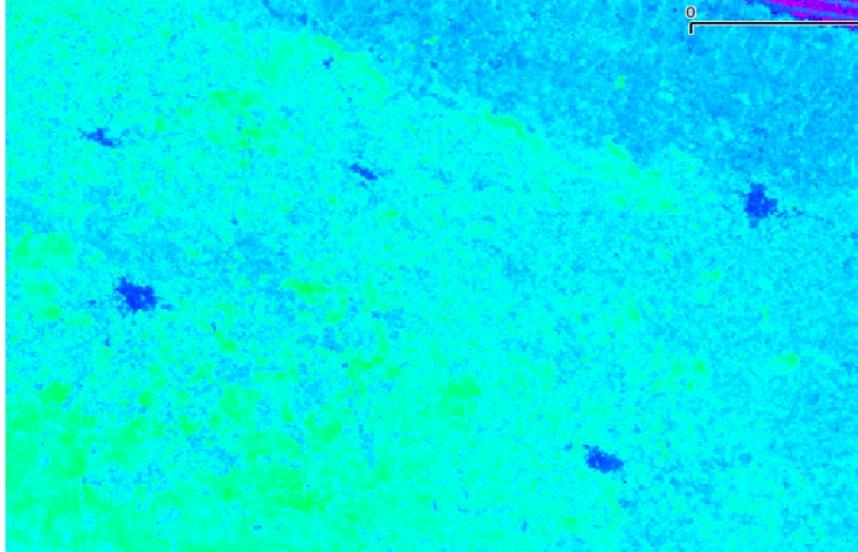


Fig. 50 Built-up Areas Index da Landsat 2009

I valori presenti nella mappa generata applicando il BAI vanno da -1 a 1 e questo lo si evince anche dalle statistiche di base (modulo r.stats di GRASS) effettuate sul raster.

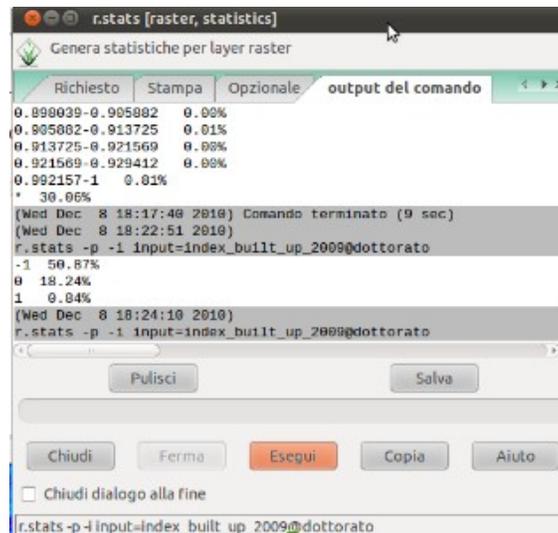


Fig. 51 Modulo r.stats

Quindi applicando una differenza tra le due mappe con indice BAI si potrebbero mettere in evidenza le variazioni dello stesso indice. In alternativa, si potrebbe riclassificare le

mappe scegliendo un valore di soglia dell'indice e assegnare ai pixel con valori sopra la soglia il valore 1 e ai pixel con valore sotto soglia il valore 0 (effettuando così una riclassificazione).

In questo ultimo caso, per fare la change detection, basta fare una sottrazione algebrica tra le due matrici.

Nella stessa analisi sono stati applicati indici di autocorrelazione. In uno studio di autocorrelazione spaziale con dati satellitari è importante definire quali sono gli eventi spaziali, la loro natura quantitativa (intensità) e la concettualizzazione delle relazioni geometriche. Un evento spaziale è chiaramente il pixel analizzato e di solito vengono considerate le coordinate geografiche del suo baricentro. Nell'immagine processing le misure globali di autocorrelazione spaziale forniscono un singolo valore che indica il livello di autocorrelazione spaziale nell'ambito della distribuzione della variabile, cioè l'omogeneità di un dato valore all'interno dell'immagine in esame. Misure locali di autocorrelazione spaziale forniscono un valore per ogni posizione all'interno della distribuzione della variabile consentendo di identificare un andamento di un fenomeno nello spazio non molto evidente con altre tecniche. Indicatori globali e locali possono essere calcolati utilizzando come intensità canali spettrali, combinazioni spettrali e/o multi-temporali. Al fine di identificare le aree di espansione urbana, bisogna cercare il cambiamento nella struttura spaziale tra le immagini a due date differenti. La dipendenza spaziale può essere acquisita utilizzando tecniche come Moran I e di Geary C.

Per un dato pixel, il cambiamento da una data all'altra sarà a causa di variazioni della struttura spaziale dello stesso pixel; la mancanza di differenze spaziali a due date non indurrà cambiamenti.

I risultati di queste analisi possono essere rappresentativi se la natura e l'estensione dell'autocorrelazione spaziale varia significativamente all'interno dell'area di interesse.

Quindi per poter avere un approccio del genere bisogna prendere in considerazione: (i) gli indicatori locali di associazione spaziale e (ii) l'ipotesi che una regione con

insediamenti urbani presenterà omogeneità in risposta spettrale a causa della ridotta variazione spaziale e spettrale del calcestruzzo e dei materiali da costruzione.

Il confronto è stato effettuato usando mappe NDVI alle singole date 1999 e 2009 con la mappa ottenuta come differenza tra NDVI 1999 e il 2009.

La figura 53 (dall'alto in basso) mostra indici di autocorrelazione locali Getis Gi, Geary locale C e LISA applicato con Lag 2. Tutte e tre le immagini rivelano chiaramente l'aumento della superficie urbanizzata, Getis, Geary c e Moran della mappa ben mostrano variazioni legate al cemento ed ai materiali da costruzione.

I risultati mostrati possono essere confrontati con la foto aerea. In particolare, diverse aree urbane sono evidenziate con l'ellisse per confrontare meglio i risultati. In queste immagini le aree con autocorrelazione sono rappresentate da pixel dello stesso colore. Le aree autocorrelate in rosso chiaro rappresentano le aree urbanizzate, mentre quelle in rosso scuro rappresentano aree non urbane.



Fig. 52 Ortofoto

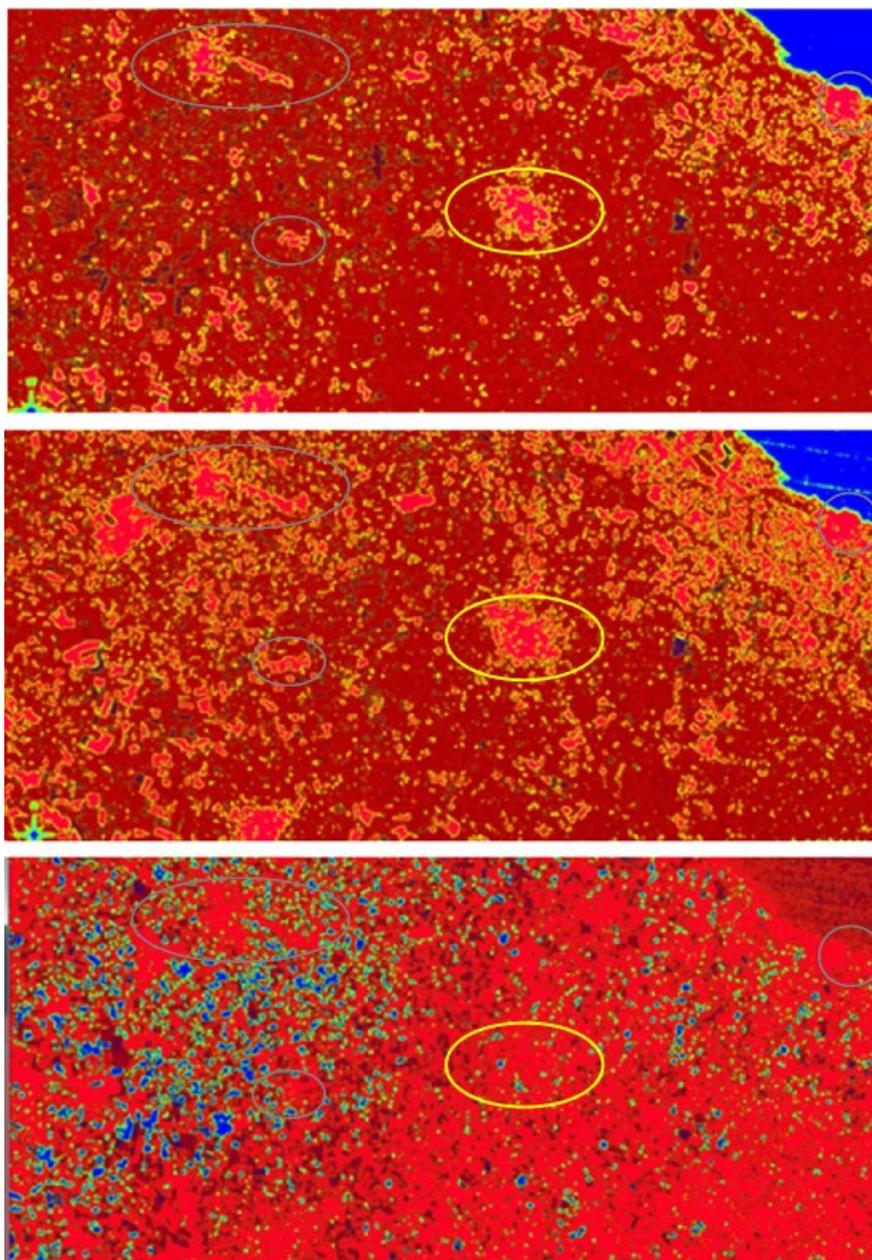


Fig. 53 (dall'alto in basso) mostra indici di autocorrelazione locali Getis G_i , Geary locale C e LISA.

Osservando l'ellisse giallo e confrontandola con l'area urbana nel centro della figura si può notare come la prima, analizzata mediante l'Indice G_i di Getis & Ord, è quella che coglie meglio il fenomeno tra le tre.

Invece nella seconda immagine (che rappresenta l'indice di Geary C_i), i pixel in rosso chiaro sono troppo grandi e le zone autocorrelate comprendono non solo le aree urbane, ma anche terreni nudi.

Infine, la terza immagine, che rappresenta indice Lisa I_i , fornisce il risultato peggiore, a causa della grossa diffusione di pixel di colori differenti, il che significa che non vi è una forte autocorrelazione e le aree urbane non sono catturate da queste analisi.

L'autocorrelazione e, in particolare, Moran e Getis & Ord G sono stati calcolati anche utilizzando l'indice BAI come intensità. Il primo passo è stato utilizzare l'indicatore globale per scegliere i parametri da introdurre nel calcolo: the lag distance and the rule of contiguity (la distanza dal pixel x rispetto alla quale c'è maggiore autocorrelazione). A tal proposito il tipo di contiguità scelta è la contiguity queen's (ossia contiguità in tutte le direzioni) perché l'analisi deve essere effettuata non privilegiando nessuna direzione in particolare.

Gli indici sono stati calcolati per diversi valori delle distanze di lag. Questo permette in prima battuta di capire quale distanza, espressa in pixel, dia maggiore autocorrelazione.

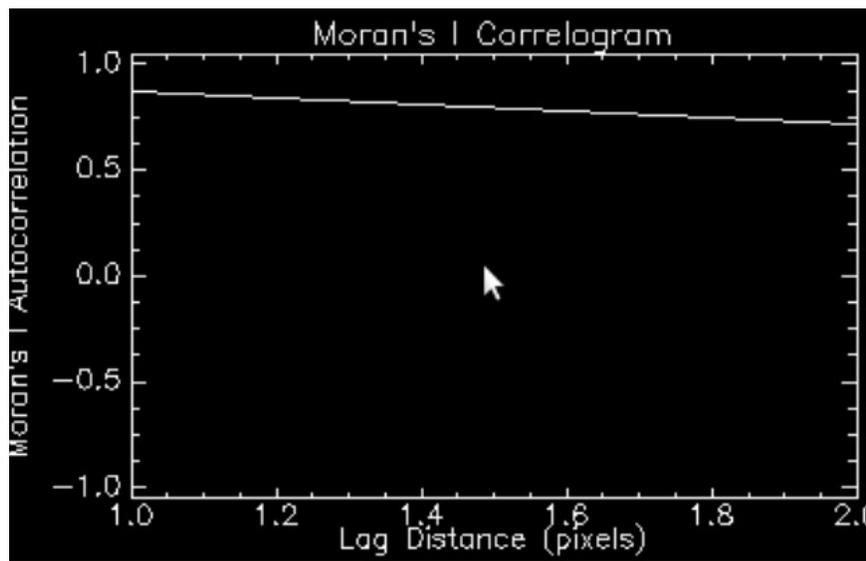


Fig. 54 Correlogramma indice di Moran

Dalla figura precedente (che conferma diverse analisi fatte su diversi raster) si evince chiaramente che, escludendo la maggiore autocorrelazione del pixel con se stesso (lag=1), il valore di Moran decresce. Pertanto il valore ottimale del lag, che consente di “cattare” al meglio l'autocorrelazione, è pari a 2.

L'indice di Moran è stato calcolato sull'area della città di Bari per l'immagine Landsat del 1976 e per l'immagine del 2009.

Per il calcolo dell'indice sono stati utilizzati i software GRASS+R.

Una volta calcolato l'indice di Moran è possibile passare agli indicatori locali che sono stati calcolati utilizzando la lag distance e la queen's contiguity. I risultati ottenuti consentono di riconoscere e caratterizzare quantitativamente l'urbanizzato dopo una classificazione dei risultati (nell'area cerchiata in rosso un esempio evidente delle modifiche avvenute dal 1976 ad oggi).

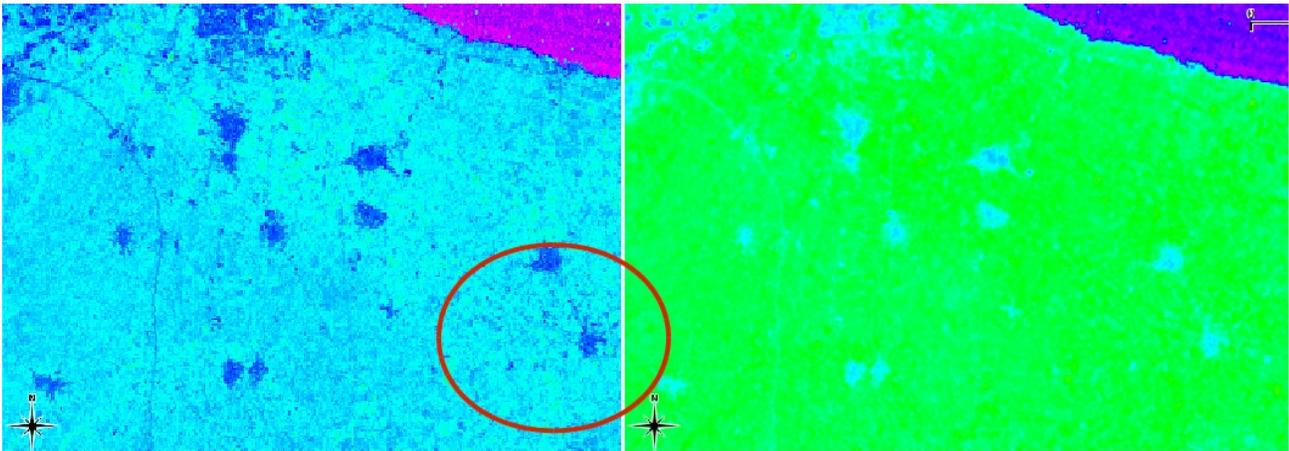


Fig. 55 area di Bari (1976) BAI e GETIS

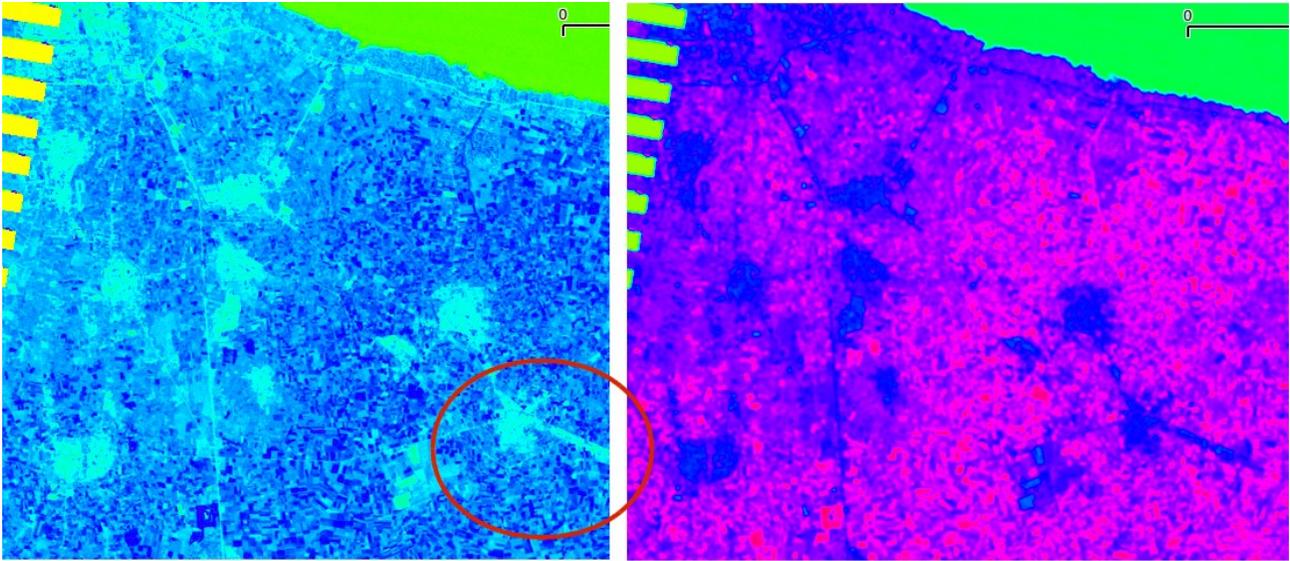


Fig. 56 area di Bari (2009) BAI e GETIS

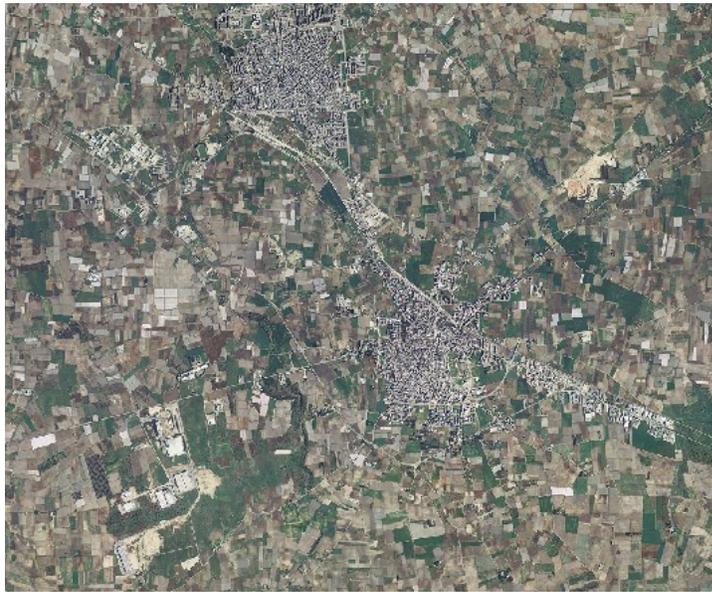


Fig. 57 Ortofoto 2008

In questo caso l'indice di Getis e Ord ha permesso di avere una migliore definizione dei cluster urbani che sono stati così evidenziati con valori più o meno alti. Come già detto, la combinazione di bande può dare ulteriori informazioni per lo studio di un fenomeno.

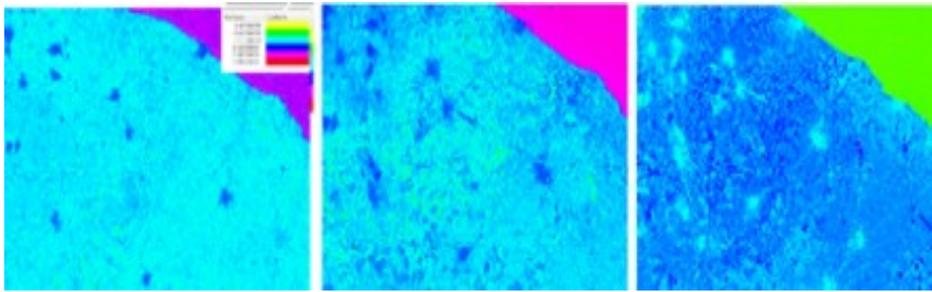


Fig. 58 Built-up Areas Index da Landsat 1976-1999-2009.

Gli indici di autocorrelazione globali e locali permettono di approfondire gli aspetti legati alla vicinanza dei pixel, fornendo come risposta la clusterizzazione degli stessi in base al fenomeno di input.

In questo modo si riesce ad avere una ulteriore lettura del territorio che va oltre la classificazione del pixel e, per questo lavoro, risulta molto importante per l'individuazione dell'espansione urbana.

6.2 APPLICAZIONE 2 - CHANGE DETECTION

La Change Detection è una tecnica comunemente utilizzata nel telerilevamento ed è stata applicata anche nella precedente applicazione.

Grazie alla copertura ripetitiva nel tempo della terra dei satelliti in orbita con intervalli temporali molto stretti e alla qualità delle immagini costante, i metodi di rilevazione dei cambiamenti territoriali sono diventati parte dei sistemi di osservazione satellitare.

La change Detection può essere definita come un modo per rilevare i cambiamenti ambientali attraverso due o più scene che coprono la stessa zona geografica acquisite nel corso di un periodo di tempo. A parte l'interpretazione visiva (molto utile per “trovare” le variazioni avvenuto in un arco di tempo) molti algoritmi sono stati sviluppati. Tra le applicazioni principali si possono ad esempio citare l'individuazione e valutazione dei cambiamenti dell'uso del suolo, il supporto per il monitoraggio dei disastri geologici, fattori meteorologici o artificiali, etc.

Al fine di poter rilevare delle variazioni, gli algoritmi di rilevamento richiedono due condizioni:

- I cambiamenti nella copertura del suolo devono essere presenti come modifiche della radianza.
- Le variazioni della radianza devono essere proporzionate al fenomeno in esame e non devono essere causa di altri fattori come condizioni atmosferiche, copertura nuvolosa etc.

Le condizioni citate dovrebbero essere riferite a scene di uno stesso sensore cercando di confrontare delle scene con stesse caratteristiche (radiazione, precipitazioni e la temperatura superficiale in combinazione con le variazioni fenologiche potrebbero portare a differenze nelle proprietà di riflettanza). Per quanto riguarda la vegetazione è opportuno adottare scene tratte nella stessa stagione dell'anno. Per quanto riguarda lo studio in esame è stata applicata la change detection sugli indici BAI individuati sulla stessa area in diverse date (1976, 1999 e 2009). Le mappe seguenti sono il risultato di un semplice utilizzo della change detection. Per ogni coppia di immagini (a partire dalla immagine più recente) è stata calcolata la differenza sull'indice. Quindi la differenza è calcolata sottraendo dall'immagine più recente quella meno recente e le classi sono definite da soglie di cambiamento. Un cambiamento positivo identifica il pixel che è diventato più luminoso (la luminosità dello stato finale è superiore alla luminosità dello stato iniziale), mentre una variazione negativa identifica i pixel che “decregono” (luminosità dello stato finale inferiore alla luminosità dello stato iniziale).

Nelle immagini seguenti, avendo come riferimento l'ortofoto che è molto recente, è possibile notare mediante le variazioni di colore dei pixel come sia cambiato il BAI.

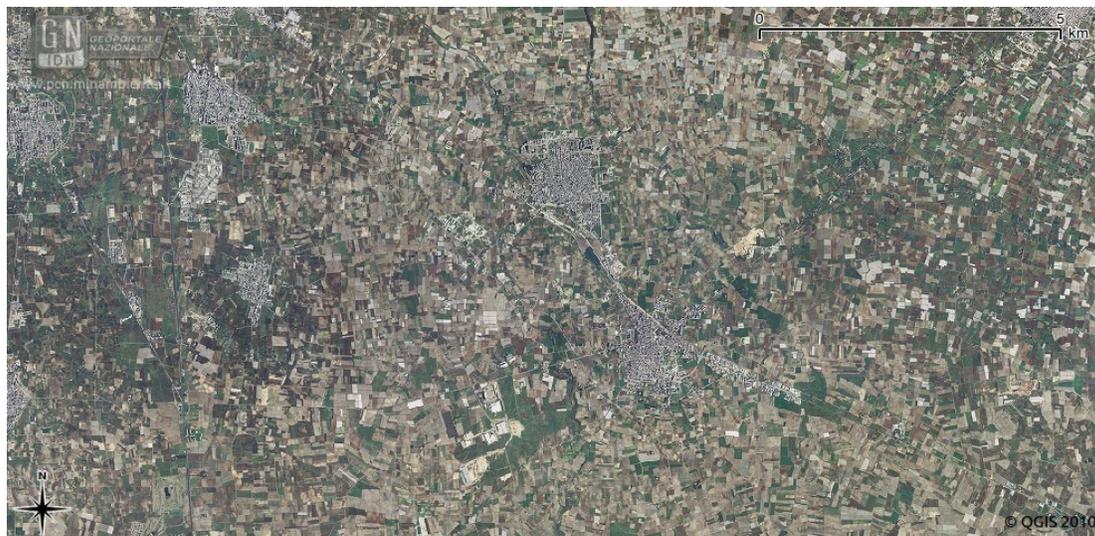


Fig. 59 ortofoto 2008 (riferimento per change detection)

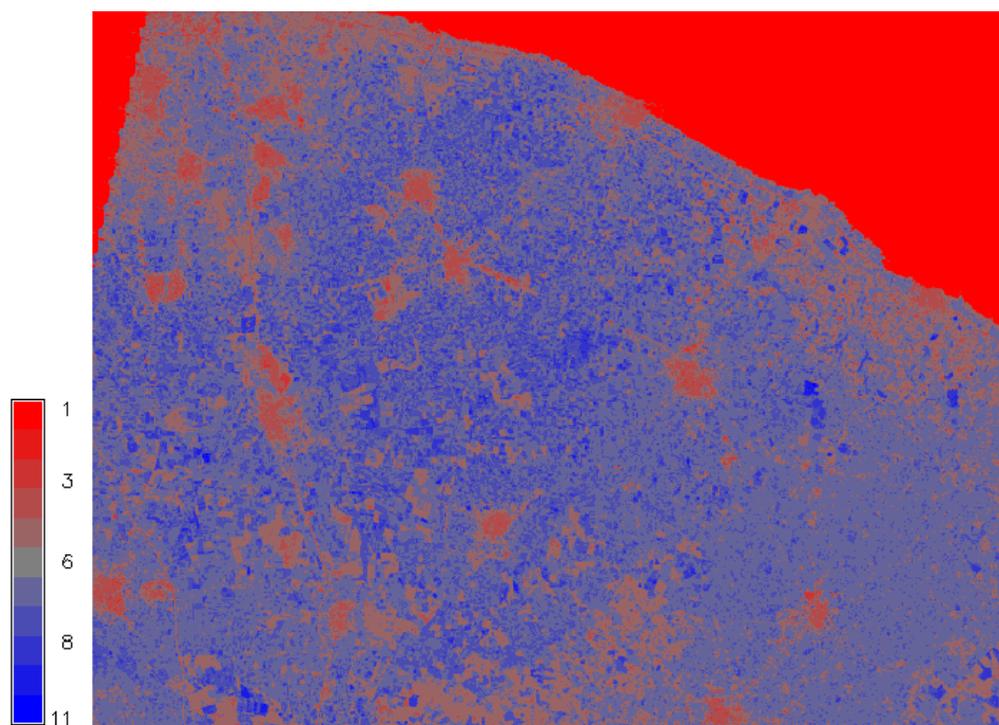


Fig. 60 change detection 2009-1999

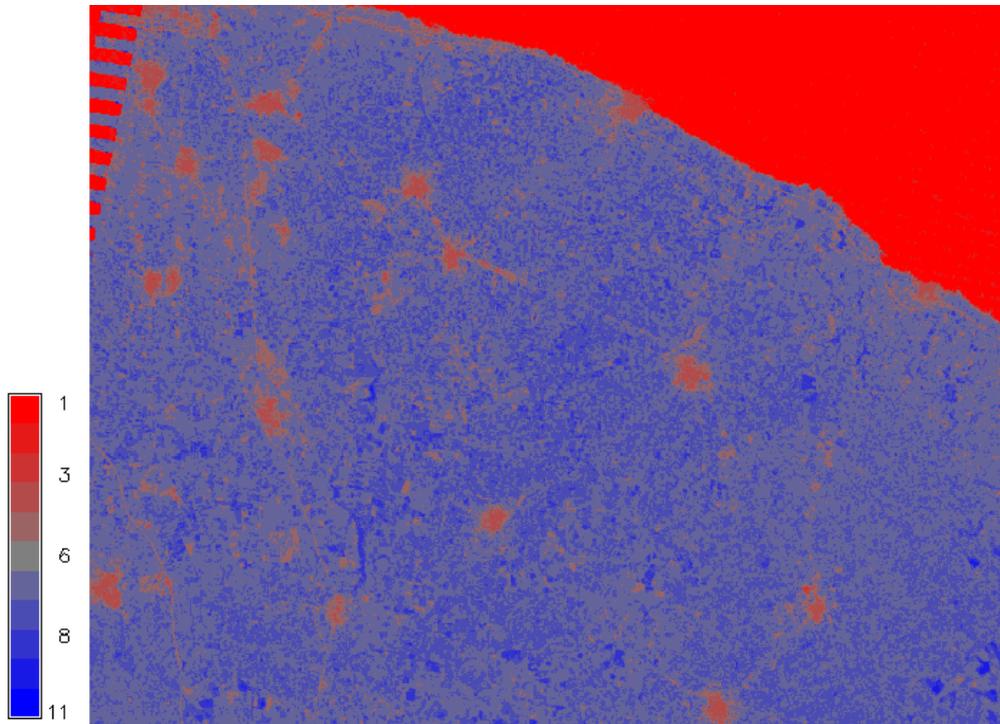


Fig. 61 change detection 2009-1976

Analizzando le mappe sono evidenti i pixel che hanno subito delle modifiche nel corso degli ultimi decenni ed è evidente come l'ambito urbano si stia man mano sempre più allargando spostandosi in aree che una volta erano il territorio aperto. Come verificato quindi e come detto in precedenza, il territorio di Bari e del suo hinterland hanno subito modifiche sostanziali negli ultimi decenni. Nell'immagine seguente è possibile visualizzare un transect su tre date differenti che mostra chiaramente i picchi dell'indice BAI nel 2009.

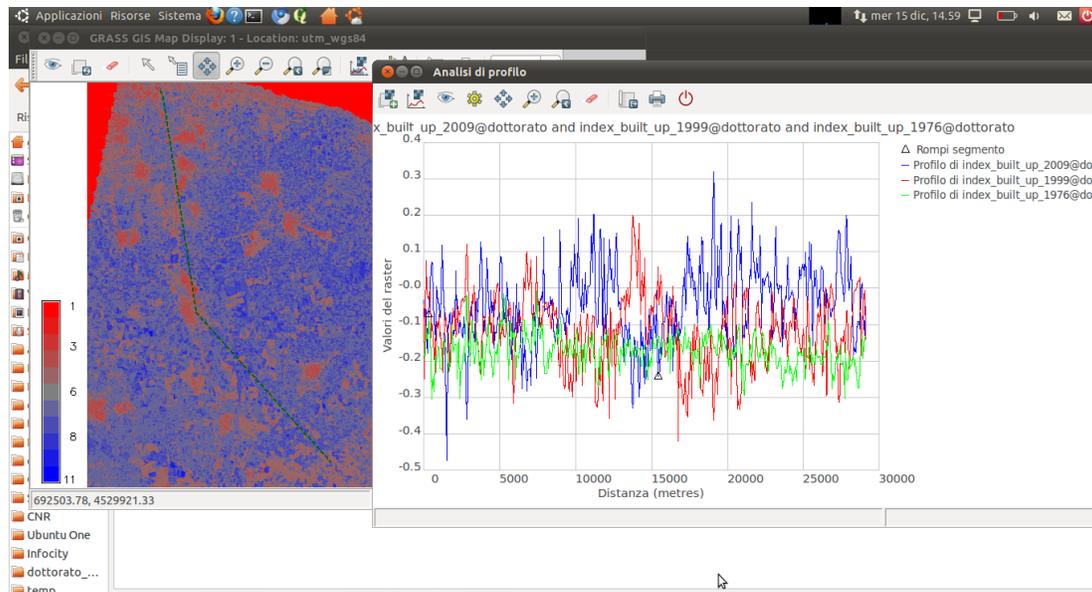


Fig. 62 Transect (in evidenza la linea blu che si riferisce all'anno 2009)

Un'altra analisi di change detection è stata fatta considerando due immagini Landsat TM acquisite nel 1999 e 2009. Le indagini sono incentrate su diverse città molto vicine a Bari. L'area di interesse è caratterizzata da una economia locale attiva e dinamica, basata principalmente sulle piccole e medie imprese operative nel commercio, industria e servizi. L'immagine seguente mostra la composizione in RGB (Rosso, Verde, Blu) e i pixel più chiari individuano le aree urbanizzate.



Fig. 63 RGB di immagini TM acquisita nel 1999. Il Blackbox indica la posizione dell'area di studio (abbastanza libera da copertura nuvolosa).

Oltre al BAI è stato nuovamente considerato l'indice NDVI sulle due date, individuando la copertura del suolo e mettendo in evidenza soprattutto la parte complementare all'urbanizzato (ossia la vegetazione).

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}}$$

Le immagini della classificazione effettuata mostrano chiaramente che l'impiego di combinazioni spettrali delle bande rosso e NIR evidenzia (in chiaro) le aree urbane. In particolare, il confronto tra il 1999 e 2009 dell'NDVI evidenzia l'espansione delle aree

urbane che sono facilmente riconoscibili da un controllo visivo. Applicando la differenza delle due immagini classificate vengono evidenziate le nuove aree urbane. Questo aumento di aree urbane, che si spiega anche con le variazioni legate a fattori economici e demografici, viene messo così in evidenza senza necessità di fare ricerche cartografiche su un'area abbastanza vasta.

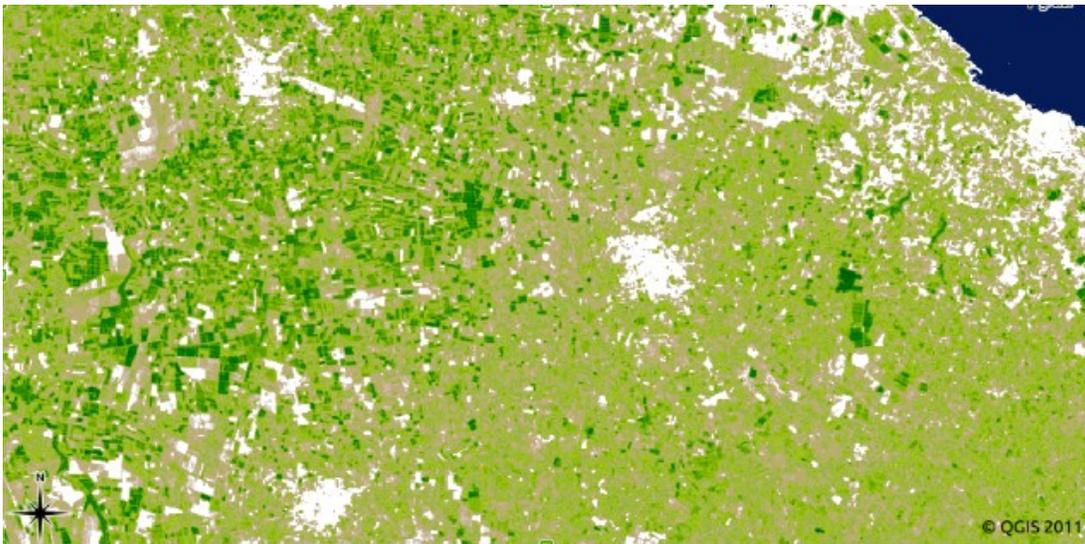


Fig. 64 NDVI map - TM 1999. I pixel chiari sono aree artificiali.

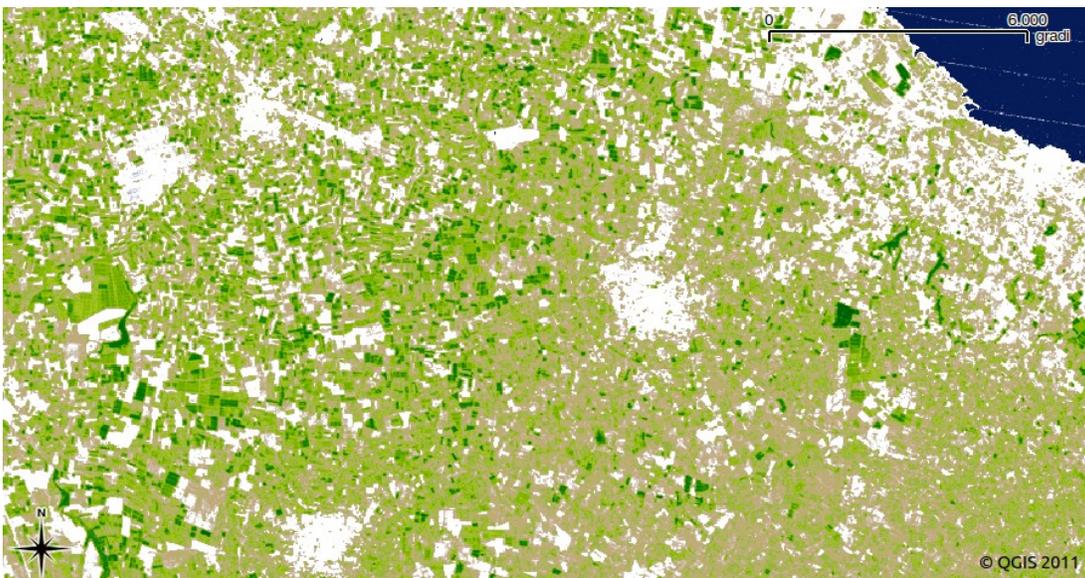


Fig. 65 NDVI map - TM 2009. I pixel chiari sono aree artificiali.

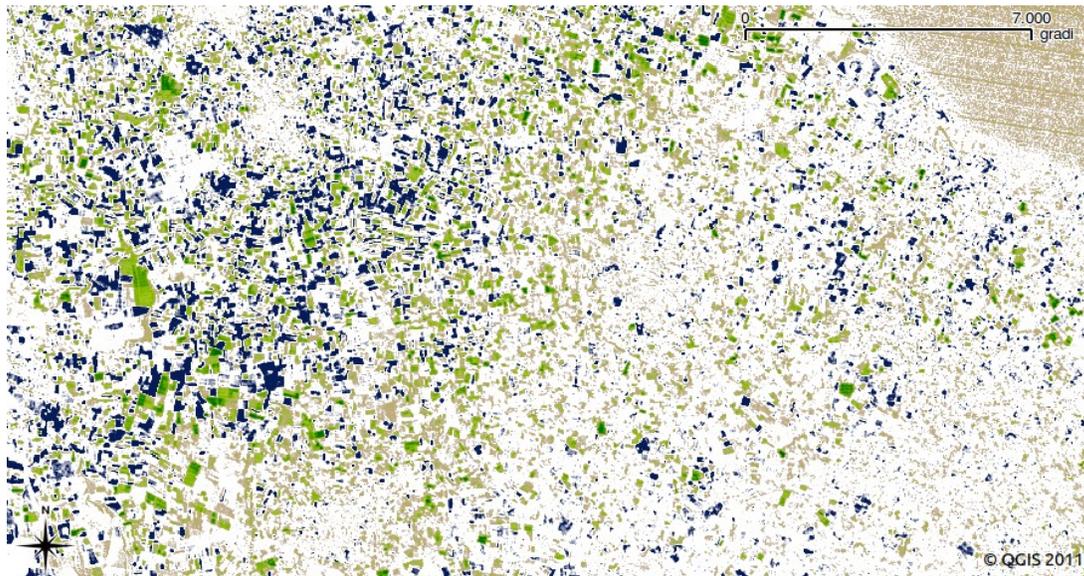


Fig. 5 NDVI difference map - TM 1999 e TM 2009. I nuovi pixel chiari mostrano variazioni dell'indice.

6.3 APPLICAZIONE 3 - STUDIO DEL SISTEMA INSEDIATIVO, VALUTAZIONE DELLA DENSITÀ URBANA E CHANGE DETECTION

In questa applicazione oltre ai dati telerilevati vengono usati da cartografici disponibili mediante il web. I dati cartografici, liberi, sono scaricabili mediante il webgis del SIT-Regione Puglia.

La zona di studio è rappresentata da un'area del territorio pugliese fortemente antropizzata a sud della città di Bari e a nord della città di Brindisi. Il focus è sempre rappresentato dal tessuto urbano che anche qui negli ultimi decenni sta subendo forti alterazioni. L'analisi riguarda l'evoluzione nel tempo e la change detection del tessuto urbano e la stima della pressione insediativa.

Il lavoro ha previsto due fasi di sviluppo. Nella prima fase è stata applicata la change detection su dati telerilevati focalizzando l'attenzione sulle aree impermeabili. Nella

seconda, invece, è stata valutata la pressione insediativa dell'edificato mediante la Kernel Density applicata sui dati del SIT-Puglia.

I risultati ottenuti delineano una crescita degli ambienti artificiali nel tempo e caratterizzano le aree con diversi gradi di pressione insediativa. Tutto questo può concorrere a definire un quadro che si propone come un valido supporto per il pianificatore.

I dati utilizzati sono il DEM e le cartografie aerofotogrammetriche del SIT della Regione Puglia e immagini satellitari ASTER; i software sono GRASS GIS, Quantum GIS ed R.

6.3.1 IL VALORE DELLA CASA IN ITALIA

L'investimento immobiliare è sempre stato privilegiato dalle famiglie italiane. Secondo l'Istituto nazionale di statistica italiano (ISTAT) più di 40 milioni di persone in Italia hanno una casa di proprietà (più del 70% della popolazione). Come termini di confronto possiamo citare la Germania nella quale la percentuale è pari al 40%. Nel 2006 il 73,3 % delle famiglie residenti (17,3 milioni su un totale di 23,6) e il 74,7 per cento degli individui (43,6 milioni) abitava in abitazioni di proprietà. Un ulteriore 9,1 per cento di famiglie (2,1 milioni) e l'8,7 per cento di individui beneficiava di alloggi in usufrutto o ad uso gratuito. Il rimanente 17,7 per cento di famiglie (4,2 milioni) e 16,6 per cento d'individui (9,7 milioni) era in affitto (ISTAT - Dossier 4 "L'accesso alla casa d'abitazione in Italia: proprietà, mutui, affitti e spesa delle famiglie").

Ovviamente lo sprawl urbano e la diffusione insediativa son legati anche ad usi non necessariamente residenziali della casa ma è ben visibile che "la voglia di casa" che c'è in Italia porta spesso ad una sproporzione tra casa, abitanti e territorio.

Uno studio recentissimo della Agenzia del Territorio Italiana del 2012 mette in evidenza le relazioni forti tra abitanti e case.

Area territoriale	Regione	Superficie abitazioni (milioni m ²)	Superficie media abitazioni (m ²)	Superficie media per abitante (m ²)	Superficie media per famiglia (m ²)
Nord Ovest	Liguria	108,5	95,2	67,1	137,4
	Lombardia	584,0	109,1	59,0	135,8
	Piemonte	311,1	115,6	69,9	154,9
	Valle d'Aosta	11,6	92,5	90,3	191,1
Nord Ovest Totale		1.015,2	109,1	63,1	141,8
Nord Est	Emilia-Romagna	280,9	115,7	63,6	143,1
	Friuli- Venezia Giulia	91,9	130,4	74,5	164,7
	Trentino-Alto Adige	73,1	120,8	71,4	171,5
	Veneto	330,2	130,5	67,0	163,1
Nord Est Totale		776,1	123,8	66,9	156,1
Centro	Lazio	327,9	110,0	58,4	142,3
	Marche	105,0	125,2	66,3	162,8
	Toscana	241,8	118,6	64,5	149,5
	Umbria	62,6	132,0	69,0	165,2
Centro Totale		737,3	116,4	62,2	149,1
Sud	Abruzzo	96,8	118,0	72,1	178,1
	Basilicata	35,2	102,3	59,9	152,6
	Calabria	136,7	108,1	68,0	174,8
	Campania	316,4	117,0	54,4	150,6
	Molise	25,3	114,4	79,1	195,6
	Puglia	247,4	110,7	60,5	161,3
Sud Totale		857,8	113,0	60,6	161,2
Isole	Sardegna	117,4	124,1	71,1	172,3
	Sicilia	335,3	110,3	66,4	166,5
Isole Totale		452,7	113,6	67,5	168,0
Italia		3.839,1	114,7	63,5	153,0
Δ anno precedente		1,5%	0,3%	1,4%	0,8%

Tab. 10 Indicatori regionali spazio abitativo (fonte: agenziaterritorio.it)

La tabella 10 mostra dei valori importanti sul rapporto esistente tra le superfici occupate dagli edifici e gli abitanti e, inoltre, viene indicata anche la crescita del dato rispetto all'anno precedente (ad esempio in Puglia c'è stato un aumento di 1,4% di superficie media per abitante). Analizzando le superfici medie stimate si può osservare come le superfici medie per famiglia siano molto superiori nelle regioni del sud. Nell'Italia meridionale il valore della casa e della proprietà della stessa, assumono un ruolo molto

importante. Ad esempio, è noto che nel sud molte volte vengono costruite abitazioni dai genitori per i propri figli e spesso, quest'ultimi, per mancanza di lavoro sono costretti ad emigrare.

Tutto questo, insieme all'abusivismo edilizio e ad un mancato controllo e monitoraggio del territorio portano alla dispersione di edifici in aree extraurbane. L'area di studio è sempre la stessa ma in questo caso riguarda una fascia territoriale che interessa alcuni comuni a sud della Provincia di Bari e altri a nord della provincia di Brindisi con una parte del territorio costiero e una zona interna.

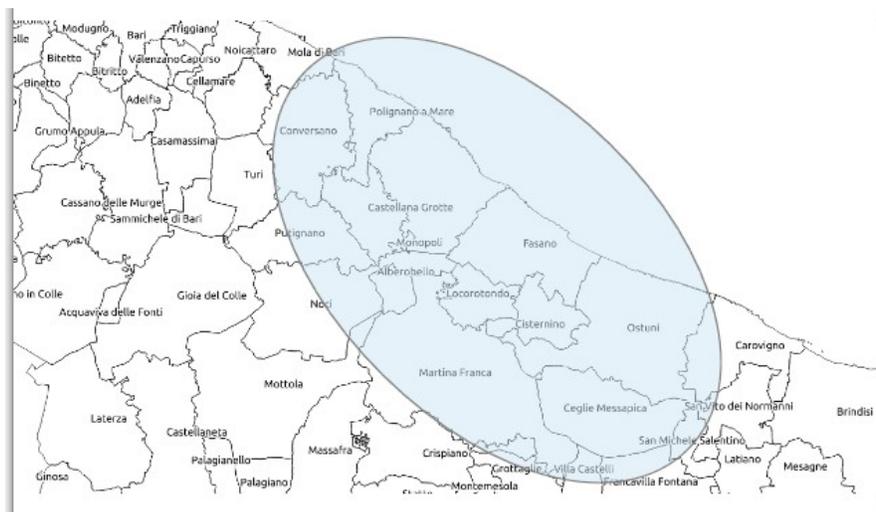


Fig. 66 Area di studio.

L'applicazione ha riguardato diversi territori comunali e un'analisi specifica è stata condotta su un piccolo comune dell'entroterra (Cisternino). Il territorio comunale di Cisternino ha una estensione territoriale pari a circa 54 km² con una popolazione di circa undici mila abitanti. Esso rappresenta l'emblema della contraddizione che è presente nella mancanza di relazione tra la crescita urbana e l'andamento demografico.



Anno	Popolazione residente
2001	12.076
2002	12.054
2003	12.039
2004	12.052
2005	11.986
2006	11.944
2007	11.951
2008	11.914
2009	11.894
2010	11.884

Fig. 67 Territorio comunale di Cisternino. Edificato e andamento demografico Cisternino.

I dati sulla popolazione dimostrano come la popolazione residente sia sempre in calo ed è sicuramente interessante capire quale sia stato l'andamento delle aree edificate negli anni.

6.3.2 DATI

I dati satellitari possono essere molto utili per la pianificazione del territorio e per l'analisi dello sprawl urbano. In questo caso sono state utilizzate le immagini multispettrali della missione ASTER (Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer) del sensore TERRA (progetto NASA-EOS). Come già detto nei precedenti capitoli, il sistema comprende tre sottosistemi separati ciascuno dei quali opera in distinte regioni spettrali: visibile e vicino infrarosso (VNIR), infrarosso medio (SWIR) e infrarosso termico (TIR). Come già detto, a partire da Aprile 2008, lo SWIR detector ha cominciato ad avere un funzionamento anomalo e questo pone un problema importante per effettuare analisi su dati recenti. Le immagini ASTER scaricate sono georiferite in UTM WGS84, in formato Geotiff e sono del Level-1B (L1B), ossia radiometricamente calibrate.

Satellite	anno di lancio	sensore	nome banda	range Wave length(micrometri)	risoluzione spaziale(metri)
TERRA	1999	ASTER	GREEN	0,52 – 0,60	15
			HFI	0,63 – 0,69	15
			N-IR	0,76 – 0,86	15
			N-IR	0,76 – 0,86	15
			4	1,60 – 1,70	30
			5	2,145 – 2,185	30
			6	2,185 – 2,225	30
			7	2,235 – 2,285	30
			8	2,295 – 2,365	30
			9	2,36 – 2,43	30
			10	8,125 – 8,475	90
			11	8,475 – 8,825	90
			12	8,925 – 9,275	90
			13	10,25 – 10,95	90
14	10,95 – 11,65	90			

Tab. 11 Caratteristiche dato ASTER

I dati ASTER utilizzati in questo lavoro sono relativi alla prima settimana di agosto e si riferiscono all'anno 2000 e all'anno 2007.

Per quanto riguarda i dati cartografici della Regione Puglia, dalla cartografia tecnica sono stati estratti i poligoni riguardanti gli edifici civili e i punti indicanti la quota di gronda di ogni fabbricato.

E' utile fare delle considerazioni su questi dati cartografici. La Puglia è stata tra le prime regioni italiane a muoversi verso la strada degli Open Data anche se, attualmente, esistono dei vincoli abbastanza importanti sull'uso possibile dei dati.

Per avere accesso alle informazioni spaziali è necessario effettuare una registrazione al sito <http://www.sit.puglia.it/> per ottenere le credenziali con cui loggarsi al sistema. Una volta effettuata la selezione dei dati da scaricare, si riceve una mail e all'atto del download dei dati si devono accettare due differenti disclaimer che impediscono principalmente il riuso dei dati a fini commerciali (in sostanza, i professionisti non possono usare i dati distribuiti dalla per il proprio lavoro) ed é sempre necessario citare la fonte "SIT-Regione Puglia" nei casi in cui vengano utilizzati. Tuttavia, al momento in cui scrivo, sembra che sia in atto una revisione da parte della Regione Puglia sulla licenza dei suddetti dati.

6.3.3 METODOLOGIA

Il lavoro è suddiviso in due parti. Nella prima parte viene considerata la classificazione delle aree edificate e la change detection con particolare attenzione al consumo di suolo. Nella seconda parte viene valutata la pressione insediativa sul territorio.

6.3.3.1 CLASSIFICAZIONE E CHANGE DETECTION

Nella prima parte è stata applicata una classificazione supervisionata e successivamente la change detection. Le immagini Geotiff Aster sono state importate nel database GRASS ottenendo un raster per ogni banda.

Prima di iniziare con le elaborazioni è stata apportata la correzione atmosferica delle immagini mediante l'algoritmo 6S (Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum) con GRASS.

Il processo di elaborazione ipotizzato all'inizio prevedeva l'uso di tre indicatori di Telerilevamento che, opportunamente combinati, dovevano “produrre” una mappa binaria del territorio urbanizzato.

Gli indici inizialmente considerati sono il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), il Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) e il Normalized Difference Built-up Index (NDBI).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad MNDWI = \frac{(GREEN - MIR)}{(GREEN + MIR)} \quad NDBI = \frac{(MIR - NIR)}{(MIR + NIR)}$$

I tre indici, applicati attraverso la combinazione di bande, sono utili per mettere in evidenza la vegetazione, le aree con presenza d'acqua e le aree artificiali.

Esaminando dapprima la vegetazione, tra i diversi indici descritti in letteratura, l'indice NDVI è quello più ampiamente utilizzato. Esso ha “restituito” una mappa della vegetazione con un buon grado di attendibilità. Nell'immagine seguente è possibile notare le firme spettrali (estratte da GRASS mediante il tool i.spectral) di alcuni oggetti dell'area di studio presi come campione.

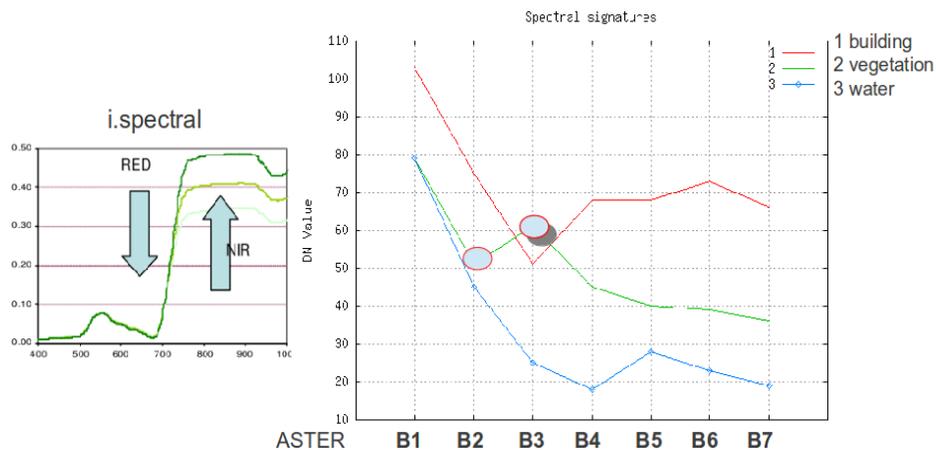


Fig. 68 NDVI. Firma spettrale di oggetti appartenenti alle classi: building, vegetation, water.

Per l'identificazione delle acque, è stata fatta una comparazione tra l'indicatore MNDWI e NDWI (che utilizza la banda del NIR anziché del MIR). Facendo una considerazione sulle risposte spettrali di edificato e acqua, essi hanno comportamenti simili nelle bande B1 (Green) e B3 (Nir). Applicando quindi l'NDWI si ottiene una classificazione che riporta valori simili delle aree edificate e delle acque, impedendo di fatto una buona discriminazione degli stessi pixel. Usando invece la banda B4 (Mir) anziché la B3, la distinzione dei pixel è più netta.

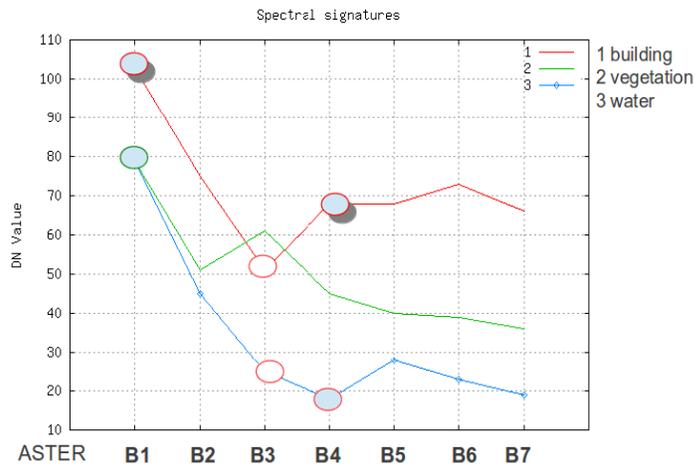


Fig. 69 MNDWI. Firma spettrale di oggetti appartenenti alle classi: building, vegetation, water.

Infine, l'applicazione dell'indicatore “principale”, che doveva essere l'NDBI, ha riportato risultati scadenti. Molto probabilmente questi risultati sono dovuti alla varietà tipologica degli edifici. Difatti la firma spettrale di alcuni edifici dell'area di studio è congruente con il rapporto tra bande (B4 e B3) ma molti altri, con diversi materiali di costruzione, hanno delle differenze in termini di risposte spettrali anche importanti.

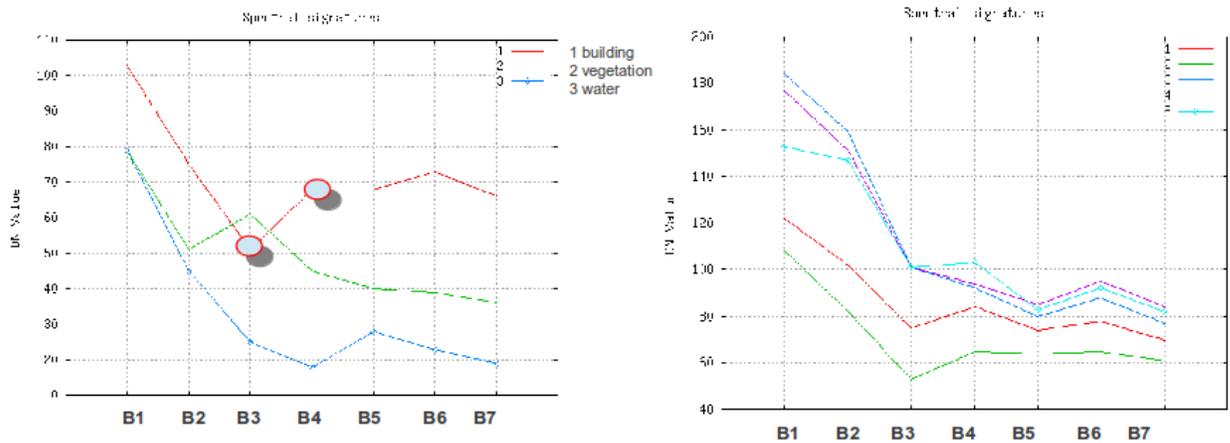


Fig. 70 NDBI. Firma spettrale di un edificio “tipo” (sinistra). Firme spettrali di diverse tipologie di edifici (destra).

Quindi l'ipotesi di usare la combinazione dei tre indici è stata tralasciata.

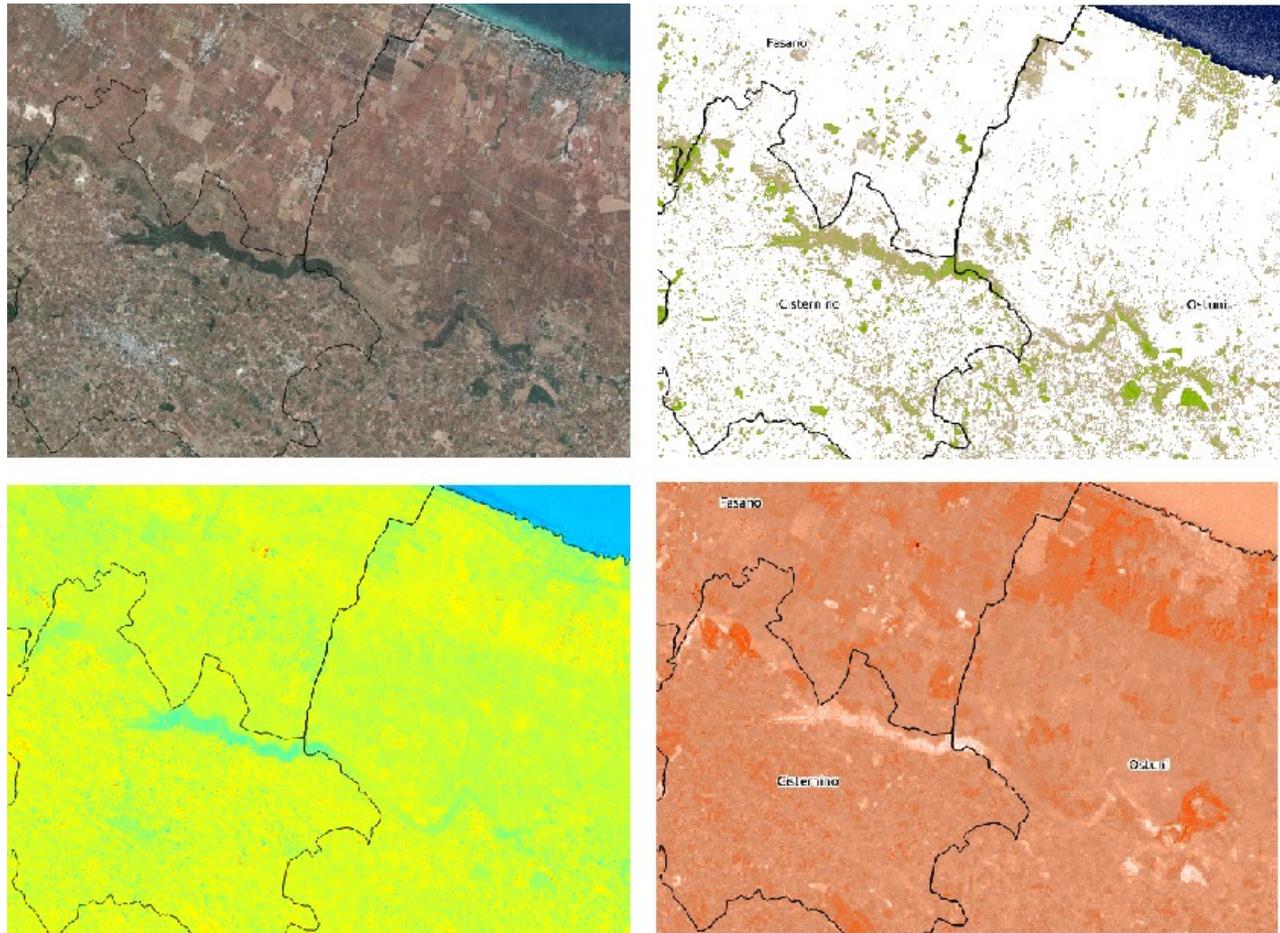


Fig. 71 Ortofoto e NDVI (prima riga) MNDWI e NDBI (seconda riga).

I risultati dell'indice NDBI non apprezzabili, hanno quindi comportato una modifica delle metodologia pensata inizialmente. Invece di applicare l'NDBI si è optato per una classificazione supervisionata e, in particolare, per la maximum likelihood (MLC). La MLC è stata applicata in GRASS e in prima analisi è stato necessario definire accuratamente le aree training del territorio esaminato. Al fine della corretta individuazione delle aree training, che hanno compreso le diverse tipologie di coperture

degli edifici, è stato molto utile poter disporre di dati ancillari del SIT-Puglia, quali, ad esempio, l'uso del suolo e l'edificato.

Gli oggetti da classificare, come già detto, sono tipologicamente diversi e il risultato della MLC è stato migliorato usando gli indici NDVI e MNDWI (con valori di soglia pari rispettivamente a 0,3 e 0,4) per isolare i pixel urbani ed eliminare i pixel classificati come vegetazione o come acqua. Uno dei miglioramenti evidenti nell'uso delle soglie ha riguardato l'eliminazione di pixel che erano classificati erroneamente come urbani lungo parte della costa.

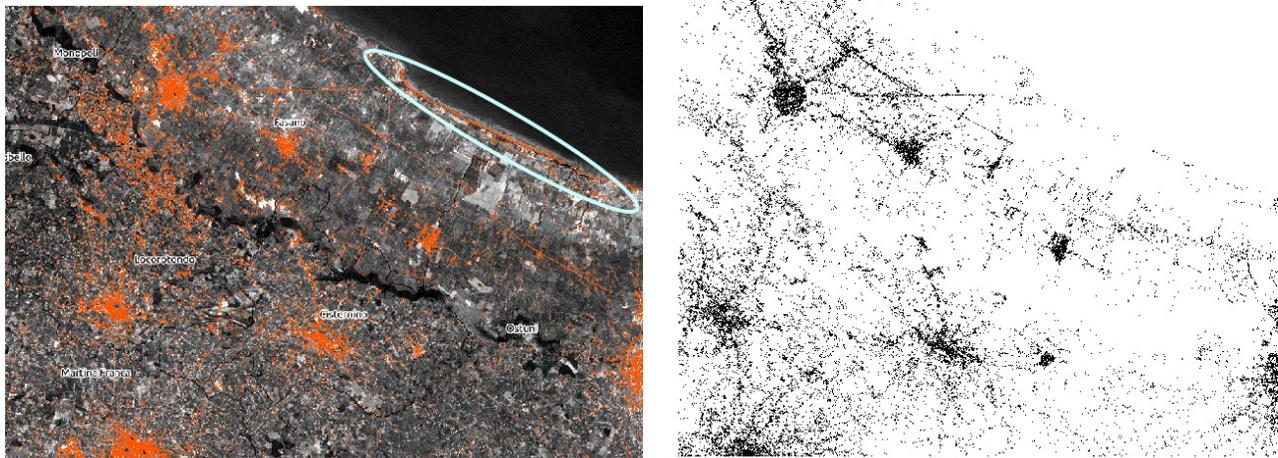


Fig. 72 Classificazione MLC (viabilità e edifici) e filtraggio con soglie.

Quindi l'applicazione della MLC con l'uso successivo delle soglie ha portato ad ottenere la mappa binaria (urbano/non urbano) per l'anno 2000 e per l'anno 2007. Per l'anno 2007 è stato effettuato un confronto con l'edificato estrapolato dalla cartografia tecnica (anche la cartografia aereofotogrammetrica disponibile sul SIT-Puglia è del 2007; per gli anni precedenti e successivi non è disponibile cartografia).

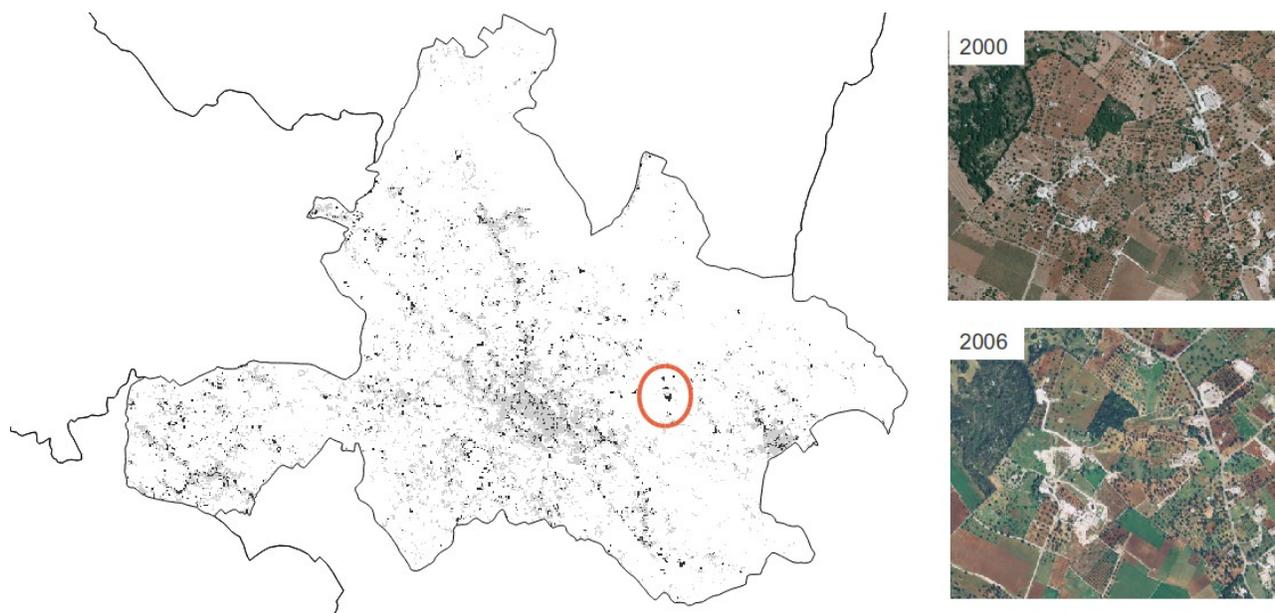


Fig. 73 Cisternino. Classificazione binaria edificato anno 2000 (pixel chiaro) e anno 2007 (pixel scuro).

In base alle mappe binarie ottenute è stato possibile valutare quantitativamente il consumo di suolo legato alla nascita di nuovi edifici; è stata effettuata una differenza algebrica della mappa binaria del 2007 con quella del 2000 computando una crescita urbana di circa $1,3 \text{ km}^2$ in sette anni (su un territorio di circa 54 km^2 , per una nuova percentuale di territorio occupata pari a circa il 2%)

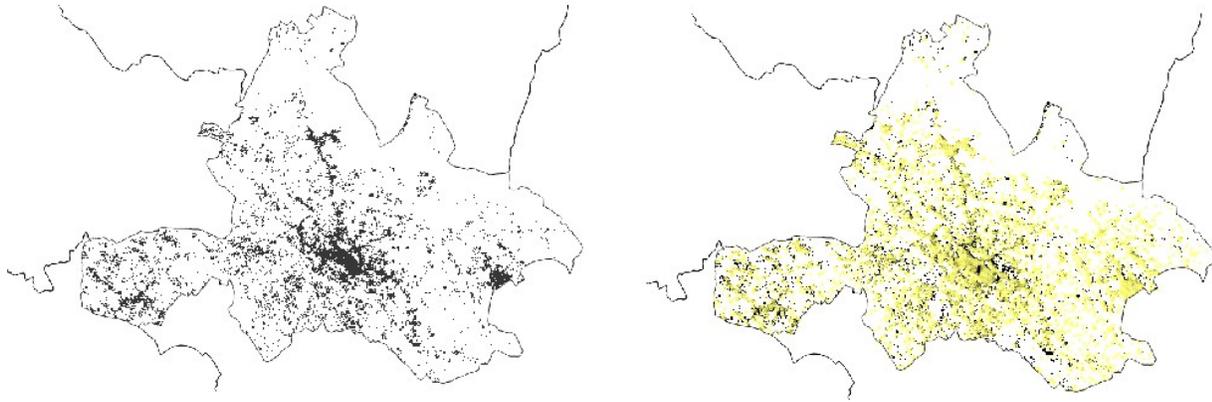


Fig. 74 Cisternino. Classificazione binaria edificato anno 2007 (a sinistra), con sovrapposizione di edifici puntuali della cartografia (a destra).

6.3.4 LA STIMA DELLA PRESSIONE INSEDIATIVA

Per stimare il carico insediativo del territorio non basta fare una valutazione solo sulla distribuzione degli edifici. E' opportuno considerare anche parametri che riguardano la distribuzione della popolazione. Per questo motivo la densità, intesa come rapporto tra numero di edifici e area, può essere caratterizzata dal numero di abitanti che popolano i suddetti edifici.

E' quindi importante valutare la densità per pixel di edifici (ad esempio, per ogni ettaro) ma è altrettanto importante considerare la “capienza” di questi edifici. La funzione KDE (Kernel Density Estimation) è una tecnica di interpolazione che fornisce una stima di densità di un fenomeno puntuale, producendo una superficie a tre dimensioni a partire da un insieme di punti distribuiti su di una regione dello spazio, una funzione mobile a tre dimensioni che pesa gli eventi entro la sua sfera di influenza, a seconda della loro distanza dal punto dal quale viene stimata l'intensità (Gatrell et al., 1996). Essa genera, avendo come input un tema puntuale vettoriale, un output raster continuo quale la densità.

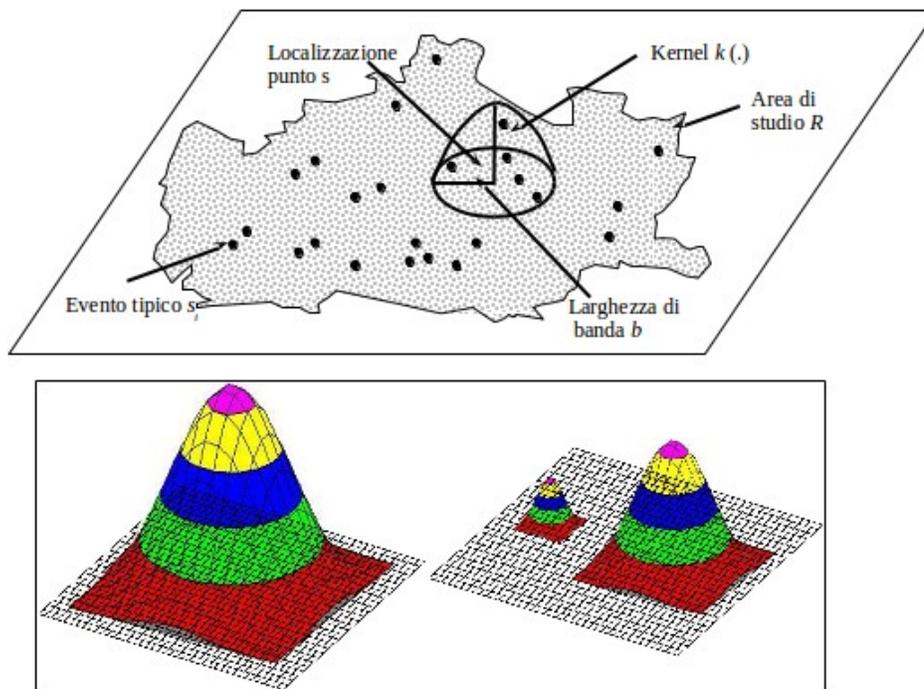


Fig. 75 Kernel Density Estimation

In questo caso l'intensità sarà data dal volume (vuoto per pieno¹⁸) dell'edificio. Al fine di considerare i due aspetti (densità e volume), si è provveduto ad assegnare ad ogni edificio (individuato come un poligono) un nuovo attributo, ossia il volume. Il volume si è ottenuto ricavando la quota di gronda di ogni edificio dalla cartografia e moltiplicandola per l'area della sagoma dell'edificio stesso.

Il poligono individuante l'edificio è stato convertito in centroide ed è stata applicata la Kernel Density Estimation (KDE) sui punti considerando il volume come parametro.

¹⁸Il volume lordo di ciascuno piano fuori terra è equivalente al prodotto della superficie lorda di piano per l'altezza relativa dello stesso piano

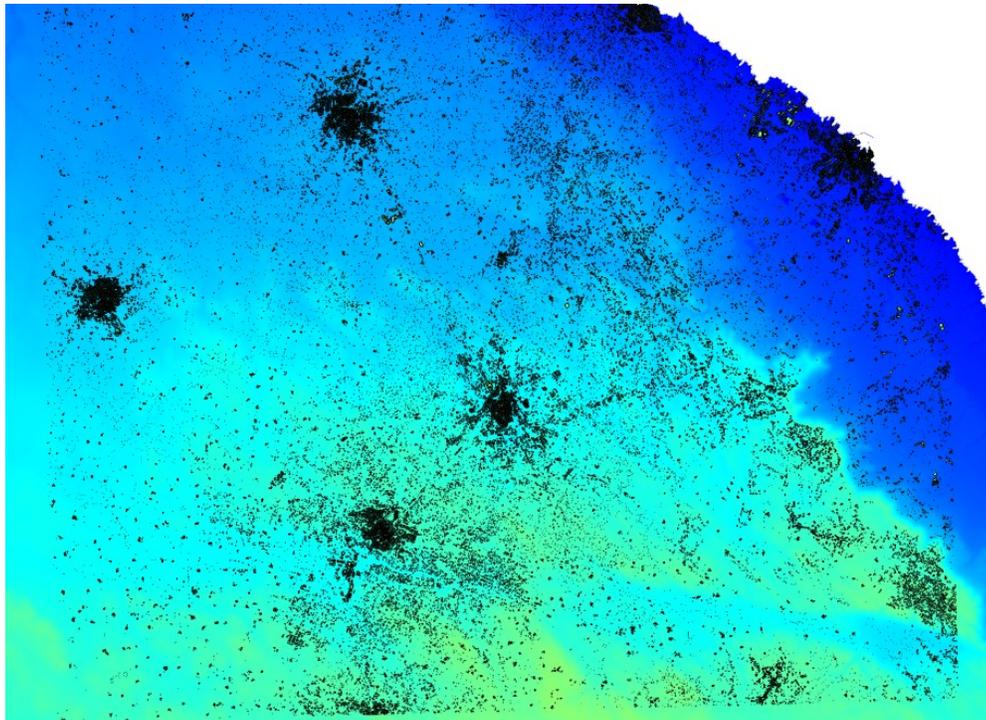


Fig. 76 DEM e edificato (SIT-Regione Puglia)

La scelta della larghezza di banda (τ), intesa come larghezza entro la quale la funzione viene applicata, influenza notevolmente la superficie risultante di densità stimata e va tarata di volta in volta. Nel seguente caso la larghezza di banda scelta è pari a 500 metri.

$$\hat{\lambda}(s) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau^2} k\left(\frac{s - s_i}{\tau}\right)$$

$\lambda(s)$ è la stima dell'intensità della distribuzione di punti (eventi) misurata nel punto s ; s_i è l' i -esimo evento, k rappresenta la funzione del kernel e τ la soglia. Dal punto di vista software il modulo della KDE utilizzato è presente nel programma R che è stato opportunamente collegato al database di GRASS.

Il risultato ottenuto mostra evidentemente un carico urbanistico e una densità elevata nei centri urbani principali ma evidenzia bene anche delle aree “esterne” che si differenziano da altre perché contraddistinte da abitazioni con volumi superiori. Questo risultato rappresenta una caratterizzazione importante del territorio e ne descrive gli aspetti caratterizzanti. Questo risulta fondamentale proprio per la gestione e il monitoraggio dello stesso territorio.

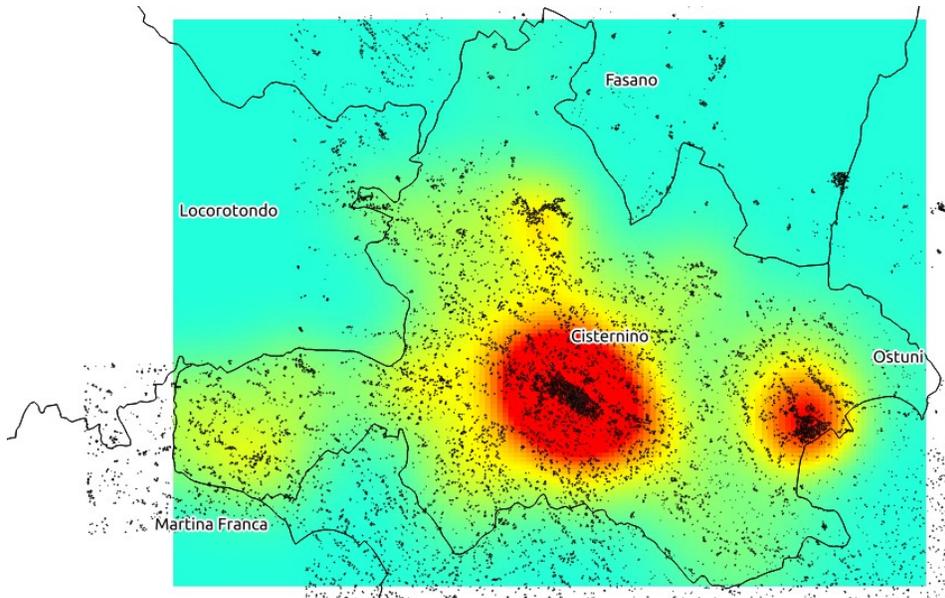


Fig. 77 Risultato della KDE con larghezza di banda pari a 500 metri con sovrapposizione degli edifici vettoriali

Questa applicazione, suddivisa in due parti, ha reso evidente di come lo studio del territorio e delle tematiche urbanistiche possono trarre beneficio dalla disponibilità sempre maggiore di dati. Tutto questo consente oggi un grado di approfondimento elevato dei problemi territoriali. E' da sottolineare però che in Italia non c'è omogenizzazione sui temi cartografici e ogni territorio, spesso anche della stessa Regione, presenta delle caratteristiche differenti.

Inoltre, in questo caso è stato palese il problema di una carenza strutturale dei DB topografici in quanto l'unico dato disponibile è relativo all'anno 2007.

Considerando che la Puglia rappresenta una Regione virtuosa in tal senso, ci si rende conto che la questione cartografia nella nostra nazione è una nota molto dolente per chi ha a che fare con il territorio.

Detto questo, il lavoro dimostra come dati telerilevati e dati spaziali “classici” possano essere usati contemporaneamente e integrati al fine di giungere ad un risultato migliore.

Nella fattispecie i dati satellitari hanno permesso di valutare uno stato della edificazione in due date differenti e di fare una change detection sull'edificato, valutando anche il consumo di suolo.

I dati della cartografia del SIT Puglia invece sono stati utili sia come elemento di confronto della classificazione supervisionata che come ulteriore analisi effettuata mediante la densità di kernel.

Il risultato finale sintetizza e caratterizza il territorio di studio sulle questioni che riguardano l'evoluzione nel tempo dell'edificato e la pressione insediativa. Il lavoro si pone quindi come un nuovo approccio, legato alle nuove tecnologie e alla nuova disponibilità di dati territoriali, sui temi che riguardano la pianificazione e gestione del territorio.

6.4 APPLICAZIONE 4 - CLASSIFICAZIONE SUPERVISIONATA DELL'URBAN SPRAWL

Lo studio dell'assetto del sistema insediativo, per fini urbanistici, viene quasi sempre affrontato attraverso l'utilizzo di dati territoriali “classici” quali ortofoto, cartografia tecnica, etc.

In questa applicazione, il territorio di studio è sempre situato in Puglia ma l'analisi è focalizzata sul territorio delle città di Polignano a Mare e Monopoli (e Conversano per una minima parte) che, nel 2011, avevano una densità di popolazione compresa tra 140 e 319 abitanti/km² (Fonte ISTAT). L'area analizzata è di circa 253 Km² con una linea di costa di circa 17 km.

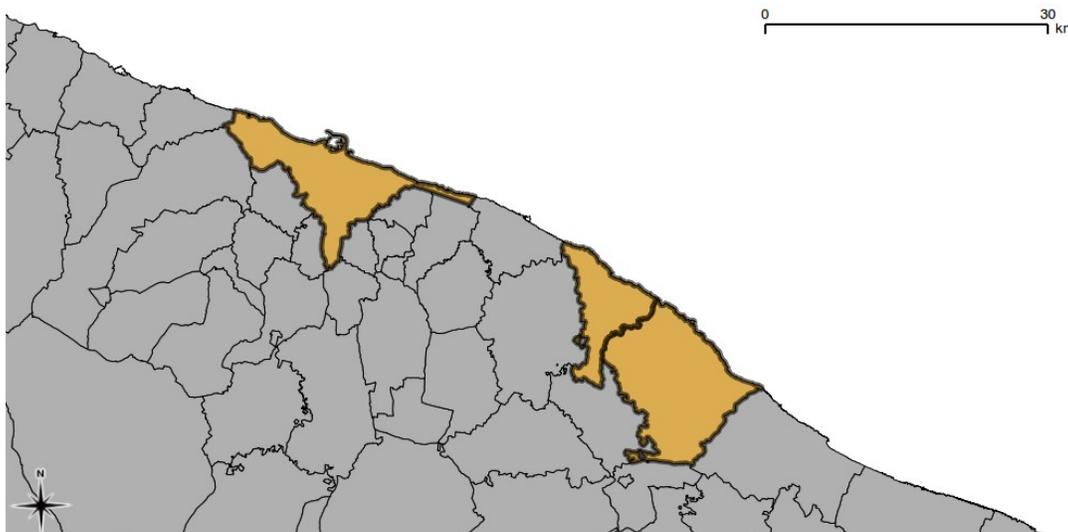


Fig. 78 Comune di Bari (in alto) e comune di Polignano a Mare e Monopoli

I dati utilizzati sono relativi alla missione Aster (<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>) e alla missione Landsat (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>). Gli strumenti utilizzati per gestire ed elaborare i dati sono GRASS GIS, Quantum GIS e R statistical project.

L'obiettivo, mediante una classificazione supervisionata, è di comprendere la distribuzione delle dimensioni della dispersione insediativa e l'espansione dinamica urbana per definire una metodologia utile all'individuazione e al monitoraggio del fenomeno stesso. Al fine di ottenere delle mappe di sintesi del territorio sono stati applicati dei classificatori facendo particolare riferimento ad un algoritmo di machine learning come la Support Vector Machine (SVM). La classificazione mediante SVM è stata messa a confronto con un algoritmo "consolidato" come il Maximum Likelihood (MLC).

L'inizio dell'applicazione ha previsto l'individuazione delle aree training che sono state rese compatibili sia sul dato Terra Aster che sul dato Landsat.

6.4.1 I CLASSIFICATORI

Mediante il package denominato Rasclass di R, che è stato integrato con GRASS, sono disponibili diversi algoritmi di classificazione che sono: Maximum Likelihood Classification (MLC) , Multinomial Logistic Regression, Neural Networks, Random Forest e Support Vector Machines (SVM). R consente di implementare nell'ambiente di base moltissimi pacchetti e, tra questi, è presente anche il pacchetto `e1071` per SVM della libreria `libsvm`.

Il Maximum Likelihood è un metodo matematico-statistico che stima la probabilità (massima) di osservare una sequenza di dati, dato un modello. L'algoritmo calcola la probabilità che un certo pixel sia in una data classe ed assegna il pixel alla classe più verosimile (alto valore di probabilità). Le dimensioni delle classi possono essere utili come peso relativo al calcolo delle probabilità. L'utente può determinare la probabilità minima perché un pixel venga assegnato e se tale valore non viene raggiunto il pixel non viene classificato.

La Support Vector Machine è anch'essa una tecnica di apprendimento supervisionato. Fa parte della classe di “macchine di apprendimento” che traggono origine da concetti riguardanti la teoria statistica dell'apprendimento e presentano proprietà teoriche di generalizzazione. La SVM può essere definita con diverse funzioni (kernel), tra i quali: Lineare, RBF e polinomiale. SVM è quindi un classificatore binario che apprende il confine fra dati appartenenti a due diverse classi. Si basa sul concetto di iperpiano che separa le classi: i dati più vicini all'iperpiano sono chiamati support vector. L'SVM riceve in input un set di dati e prevede, per ogni dato di input, quale delle due classi possibili costituisce l'uscita.

Non nasce per la classificazione di immagini satellitari ma ultimamente viene anche applicato in questo campo. Funziona proiettando gli esempi in uno spazio multidimensionale e cercando un iperpiano di separazione in questo spazio. L'iperpiano di separazione massimizza la sua distanza (il “margine”) dagli esempi di training più vicini. Una delle particolarità è che la classificazione con il metodo SVM dà buoni risultati anche con un numero limitato di aree training.

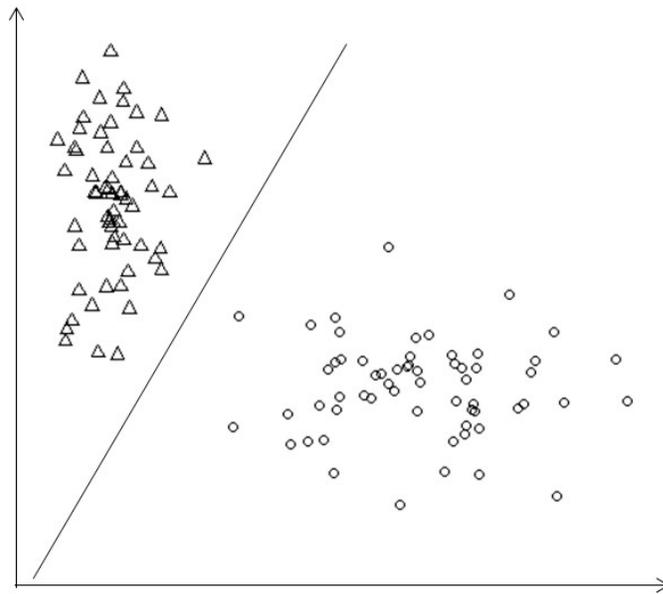


Fig. 79 Schematizzazione iperpiano e suddivisioni di classi

La bibliografia del settore mostra che l'uso di SVM per la classificazione di immagini telerilevate è promettente e incoraggiante. Tuttavia, ci sono diverse questioni che devono essere considerate e affrontate per l'uso; a tal proposito nel seguente lavoro sono state fatte molte valutazioni sulla “giusta” configurazione del modello SVM da applicare all'area di studio. Il fine è quello di valutare la bontà del metodo e di scegliere una configurazione ottimale e più possibile generalizzabile per la classificazione dell'uso del suolo e, in particolare, delle aree urbane. Dopodiché, si vuole confrontare tale metodo con quelli più “tradizionali” (come la massima verosimiglianza).

Come detto, tra i parametri fondamentali da scegliere per l'SVM c'è il kernel. I kernel usabili sono il lineare, polinomiale, il radial basis function (RBF), and sigmoid.

Matematicamente sono:

Linear	$K(x_i, x_j) = x_i^T x_j$
Polynomial	$K(x_i, x_j) = (g x_i^T x_j + r)^d, g > 0$
RBF	$K(x_i, x_j) = \exp(-g \ x_i - x_j\ ^2), g > 0$
Sigmoid	$K(x_i, x_j) = \tanh(g x_i^T x_j + r)$

dove:

g (gamma) è un parametro nella funzione di kernel usato per tutti i tipi di kernel, tranne il Linear.

d è il grado del polinomio nella funzione di kernel per il kernel polynomial.

r è bias term per il kernel polinomiale e sigmoid.

g, d, r sono parametri controllati dall'utente e la loro corretta definizione può incrementare notevolmente l'accuratezza della soluzione SVM.

Un Kernel è una funzione che trasforma i dati di input in uno spazio multidimensionale in modo tale da renderli separabili e il problema può essere risolto in un nuovo spazio.

I kernel citati sono quattro ma in letteratura, per quando riguarda le classificazioni di uso del suolo, vengono usati solitamente il kernel RBF o il polinomiale (Zhu, G., Blumberg, D.G.¹⁹ e N. Candade, B. Dixon²⁰).

Oltre al kernel, altri parametri entrano in gioco e quelli che giocano un ruolo fondamentale sono cost e gamma. Cost è un parametro che “forza” la classificazione e gamma è pari di default all'inverso del numero di bande. Più è alto il parametro Cost e più viene “forzata” la corrispondenza tra le celle da classificare e le aree training a queste sovrapposte (Cost di default è pari a 1). Il parametro Cost aumenta la flessibilità nella

¹⁹Zhu, G., Blumberg, D.G., 2002. Classification using ASTER data and SVM algorithms; The case study of Beer Sheva, Israel. Remote Sensing of Environment 80 (2), 233-240.

²⁰Candade, N and Dixon B. 2004. Multispectral classification of Landsat images: Comparison of Support Vector Machine and Neural Network classifiers. Presentation. ASPRS Annual Meeting. Denver, May 2004. Mira Digital Publishing. Bethesda, Maryland. ISBN 1-57083-072-X

separazione delle categorie creando un margine più soft di separazione permettendo alcune misclassification. Incrementando il valore di C si tende a generare un modello che non potrà essere generalizzabile.

In generale valori alti di gamma e di Cost rappresentano la condizione ottimale per giungere all'overfitting²¹ dei dati.

Gamma e Cost sono parametri critici che influenzano l'accuratezza della classificazione SVM. Non può essere noto a priori quali valori diano i migliori risultati.

Il pacchetto Rasclass restituisce in output uno o più raster classificati e, per ognuno di essi, fornisce anche i dati per la valutazione dell'accuratezza come la matrice di accuratezza di ogni classe, l'overall accuracy e il coefficiente Kappa.

Le elaborazioni da fare in GRASS e in R sono state implementate in uno script che permette, inserendo in input le aree training, di avere in output i raster classificati. I risultati ottenuti con i classificatori sono stati sottoposti a un confronto tra essi e con altri dati cartografici (ortofoto e cartografia tecnica del DB Sit-Regione Puglia). Questo permette di scegliere il settaggio dei parametri migliori e, in generale, di definire la validità del metodo SVM.

Per poter applicare i diversi algoritmi di classificazione supervisionata è necessario aver come dato input un numero di aree di prova dell'uso del suolo (training areas) derivanti da specifiche “regioni di interesse” (Region Of Interest, ROI). Le aree training sono state ottenute attraverso la digitalizzazione delle classi scelte su composizione RGB delle bande 1,2 e 3 (modulo di grass i.landsat.rgb) e attraverso ortofoto, raggiungibile col servizio WMS (<http://www.opengeospatial.org/standards/wms>) del Geoportale Nazionale (<http://www.pcn.minambiente.it/GN/>) e con quelle del DB SIT- Regione Puglia.

Le aree training scelte per “allenare” il classificatore individuate interessano 2731 pixel (nel caso di LANDSAT con pixel di 30 metri) a fronte di un totale dell'area di 282240 pixel. Quindi le aree training rappresentano circa lo 0,967 % dell'area scelta per

²¹In statistica e in informatica, si parla di overfitting (eccessivo adattamento) quando un modello statistico si adatta ai dati osservati (il campione) usando un numero eccessivo di parametri. Un modello assurdo e sbagliato può adattarsi perfettamente se è abbastanza complesso rispetto alla quantità di dati disponibili (fonte: Wikipedia)

l'applicazione. Al fine di considerare il caso più variegato possibile è stata considerata anche l'area costiera che vede la presenza di rocce e sabbia, le quali risultano spettralmente molto difficili da scindere con gli ambienti artificiali. Infatti nelle diverse classificazioni effettuate come test, i pixel sulla costa venivano spesso classificati come zone urbane (anziché sabbia e/o roccia).

Al fine di fare un ventaglio più vasto possibile, le classificazioni hanno riguardato i dati Terra Aster e Landsat, considerando dapprima solo due macroclassi di classificazione del suolo (urbano/non urbano) e successivamente 8 classi (1 urbano , 2 superfici agricole, 3 boschi e verde, 4 acqua scura, 5 acqua, 6 suoli nudi, 7 sabbia e roccia, 8 sabbia pura).

6.4.2 METODOLOGIA

La classificazione supervisionata con il dato Aster è stata realizzata utilizzando le bande con diversi raggruppamenti (3, 6 e 9 bande) e con classificazione binaria (due classi) e una classificazione nella quale sono state individuate 8 classi). Il procedimento ha avuto inizio con l'individuazione delle aree training con Quantum GIS, applicando successivamente gli algoritmi MLC e SVM ed è giunto fino al confronto dei risultati ottenuti. Al fine di testare diverse possibili configurazioni e di leggere i parametri di accuratezza, è stato implementato uno script in R che manda in esecuzione il pacchetto Rasclass che restituisce in output i raster relativi alle diverse configurazioni più matrici di confusione e parametri di accuratezza. Le configurazioni testate sono molte e di seguito sono riportati i confronti, mediante parametri di accuratezza, delle scelte più significative.

6.4.2.1 CLASSI E BANDE SPETTRALI

Sin dai primi test la classificazione effettuata con due sole classi ha restituito risultati incoraggianti ma, in un territorio così variegato, le performances migliori si ottengono con un numero maggiore di classi.

In linea generale invece l'uso di più bande porta dei miglioramenti alla classificazione (considerando però che per i dati Aster c'è un ricampionamento a 15 metri di alcune

bande); fa eccezione l'uso di 9 bande per il caso delle due classi urbano/non urbano nel quale il maggior numero di bande non porta ad un miglioramento dei parametri di accuratezza.

Uno degli elementi critici trovati in questo studio è dato dalla presenza della sabbia e della sabbia mista a roccia. E' spesso questo elemento che non consente di avere una classificazione molto "pulita" del suolo. La SVM con il Kernel RBF rappresenta sempre la scelta migliore fra le configurazioni messe a confronto, anche se, a seconda della classe di uso del suolo su cui si pone maggior attenzione, una configurazione può dare risultati migliori rispetto ad un'altra e viceversa. Per riuscire a separare bene la classi sabbia e urbano (e a volte anche quella agricola) l'aumento del parametro Cost induce a notevoli miglioramenti a scapito però del rischio di overfitting.

Nel caso del dato Aster nel primo caso sono state usate le prime 3 bande, le prime 6 e successivamente le prime 9 ricampionando alcune bande, negli ultimi due casi, a 15 metri. Le 16 configurazioni messe a confronto sono la MLC e la SVM con diversi settaggi dei parametri (scelta del kernel lineare,RBF o polinomiale, diversi valori di cost e gamma e diversi gradi del polinomio).

6.4.2.2 ASTER

2 CLASSI - 3/6/9 BANDE

Considerando la classificazione in soli due classi, la sintesi dei parametri di accuratezza mette in evidenza che i valori del coefficiente K sono sensibilmente più bassi rispetto a quelli dell'Overall Accuracy.

Il confronto dei parametri di accuratezza indica chiaramente che i risultati migliori si ottengono con la SVM rispetto alla MLC (soprattutto nel caso delle 9 bande) e, tra le configurazioni SVM, sono da preferire quelle con il kernel RBF. Non c'è molta differenza tra i valori ottenuti considerando 3, 6 o 9 bande. Uno dei problemi riscontrati in questo caso riguarda la zona costiera nella quale la sabbia viene quasi sempre classificata come urbano.

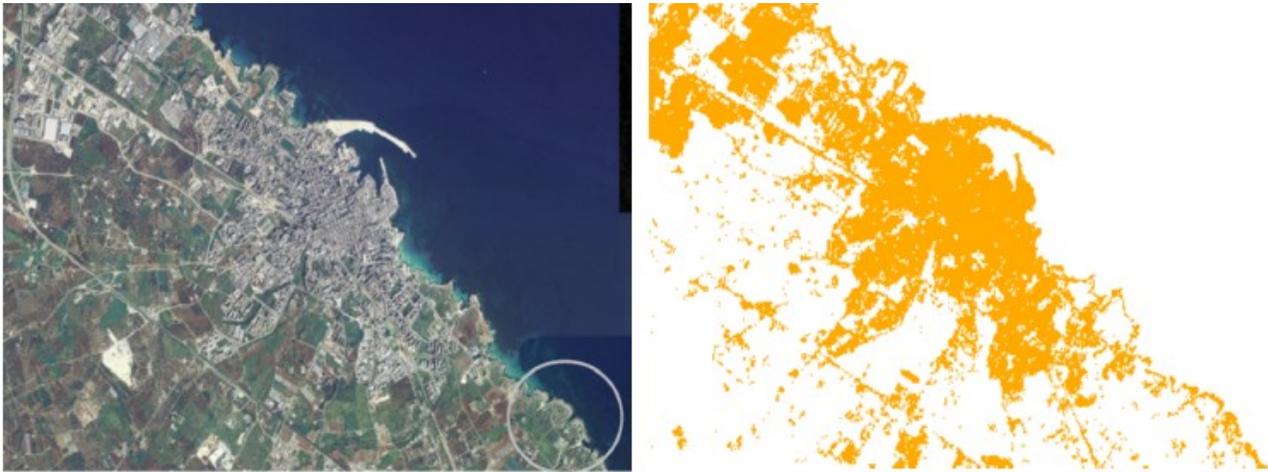


Fig. 81 Molo di Monopoli (BA) – SVM con kernel RBF e gamma=1

Nella figura seguente è possibile notare una comparazione tra MLC e due configurazioni di SVM utilizzando le 6 bande; il miglior compromesso si ottiene con SVM con Kernel RBF.



Fig. 82 Monopoli (BA) – MLC, SVM con kernel RBF e SVM con Kernel RBF cost=1000 gamma=1

Il caso di classificazione a 9 bande potrebbe risultare del tutto particolare. A tal proposito nell'immagine seguente si può notare come la classificazione con MLC a 9 bande sia esplicitamente peggiore della stessa MLC a 3 bande o 6.

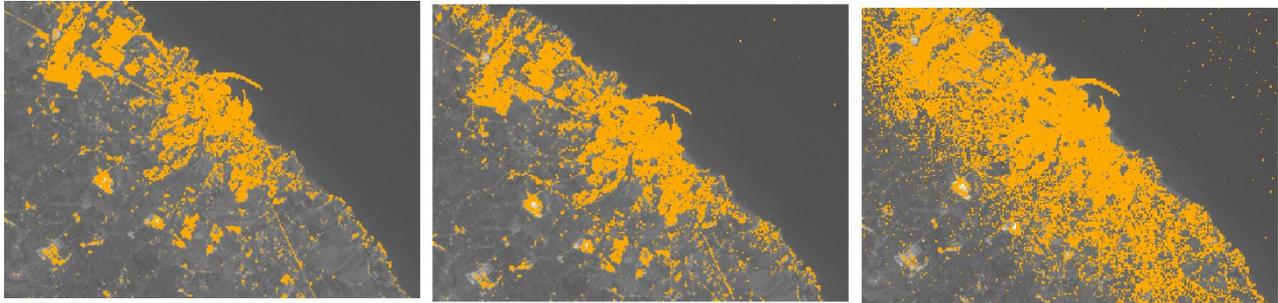


Fig. 83 Monopoli (BA) – confronto tra MLC con 3 bande, 6 bande e 9 bande (con ricampionamento a 15 metri nel caso di 6 e 9 bande)

E' utile ricordare che nel caso di 6 bande c'è un ricampionamento di 3 bande da 30 metri a 15 metri e, nel caso di 9 bande, c'è un ricampionamento di 6 bande.

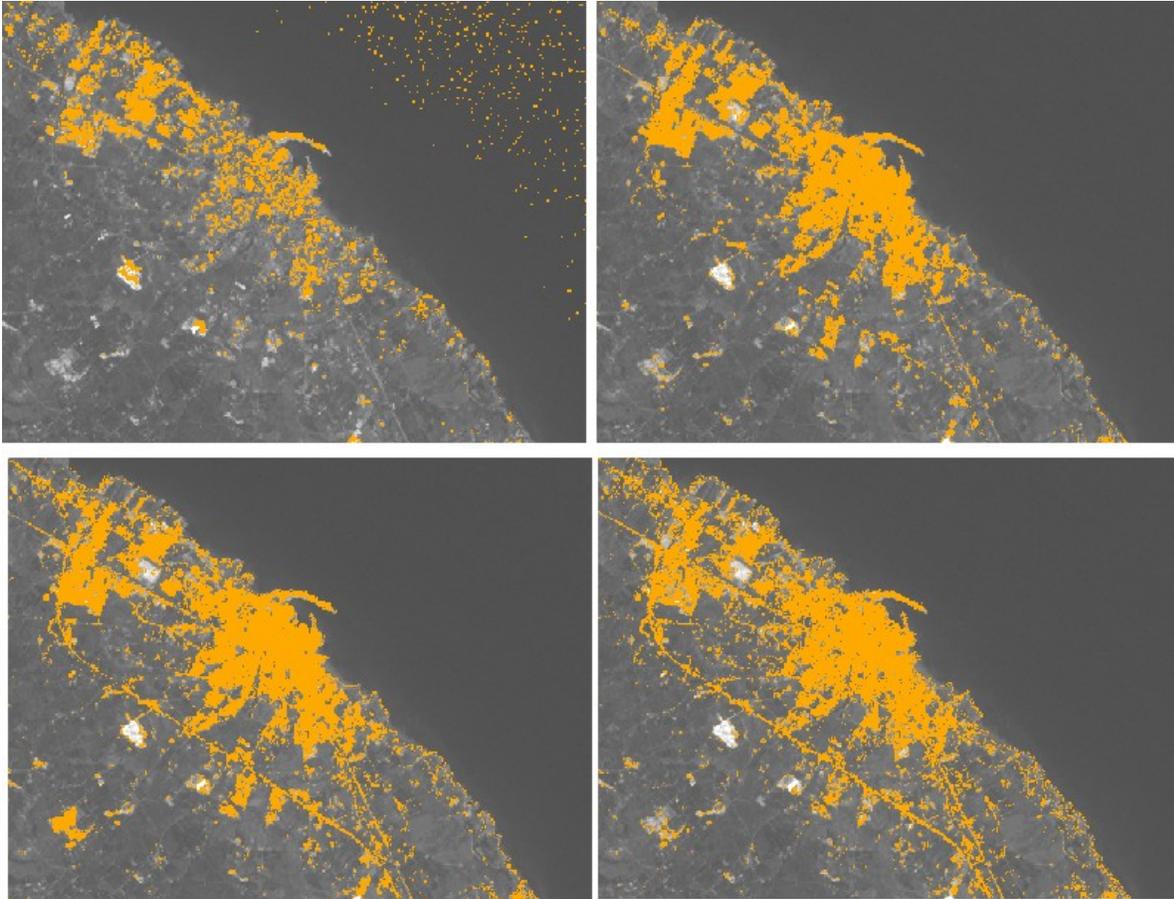


Fig. 84 Monopoli (BA) – SVM Linear, SVM RBF (prima riga) SVM RBF cost=100, svm RBF cost=100 gamma=1 (seconda riga)

Nel caso del kernel lineare i pixel urbani non “coprono” la sabbia ma è possibile notare come sia in difetto la classificazione; è chiaro come non vengano individuate ad esempio le strade.

Il miglior compromesso lo si ottiene con RBF con il parametro Cost pari a 10 o 100.

8 CLASSI - 3/6/9 BANDE

Utilizzando 8 classi si può notare che in generale i parametri di accuratezza migliorano un po' e il maggior numero di bande contribuisce ad aumentarne ancora i valori.



METODI/parametri 3 bande	Overall Accuracy	Kappa Coefficient
MLC	0,9053	0,7340
SVM Linear	0,9343	0,7692
SVM RBF	0,9596	0,8733
SVM RBF gamma=1	0,9628	0,8834
SVM RBF cost=10	0,9632	0,8850
SVM RBF cost=100	0,9666	0,8956
SVM RBF cost=1000	0,9689	0,9031
SVM RBF cost=2000	0,9696	0,9054
SVM RBF cost=3000	0,9695	0,9050
SVM RBF cost=10000	0,9700	0,9066
SVM RBF cost=100, gamma=1	0,9697	0,9057
SVM RBF cost=1000, gamma=1	0,9714	0,9111
SVM POLY degree=3	0,9352	0,7798
SVM POLY degree=5	0,9266	0,7421
SVM POLY degree=3 cost=100	0,9477	0,8275
SVM POLY degree=3 cost=100 gamma=1	0,9513	0,8406

METODI/parametri 6 bande	Overall Accuracy	Kappa Coefficient	METODI/parametri 9 bande	Overall Accuracy	Kappa Coefficient
MLC	0,9432	0,8415	MLC	0,9239	0,8002
SVM Linear	0,9504	0,8513	SVM Linear	0,9520	0,8553
SVM RBF	0,9626	0,8894	SVM RBF	0,9645	0,8949
SVM RBF gamma=1	0,9713	0,9157	SVM RBF gamma=1	0,9748	0,9262
SVM RBF cost=10	0,9705	0,9134	SVM RBF cost=10	0,9740	0,9238
SVM RBF cost=100	0,9743	0,9248	SVM RBF cost=100	0,9789	0,9383
SVM RBF cost=1000	0,9789	0,9383	SVM RBF cost=1000	0,9831	0,9506
SVM RBF cost=2000	0,9801	0,9418	SVM RBF cost=2000	0,9840	0,9532
SVM RBF cost=3000	0,9802	0,9421	SVM RBF cost=3000	0,9842	0,9538
SVM RBF cost=10000	0,9813	0,9453	SVM RBF cost=10000	0,9851	0,9564
SVM RBF cost=100, gamma=1	0,9821	0,9476	SVM RBF cost=100, gamma=1	0,9861	0,9594
SVM RBF cost=1000, gamma=1	0,9849	0,9559	SVM RBF cost=1000, gamma=1	0,9869	0,9618
SVM POLY degree=3	0,9349	0,7908	SVM POLY degree=3	0,9301	0,7737
SVM POLY degree=5	0,9203	0,7325	SVM POLY degree=5	0,9160	0,7149
SVM POLY degree=3 cost=100	0,9586	0,8744	SVM POLY degree=3 cost=100	0,9646	0,8938

Fig. 85 Aster – 8 classi – 3 bande

Nel caso delle prime tre bande e con la classificazione effettuata su 8 classi si ottengono dei risultati differenti rispetto a prima.

MLC ha come risultato una classificazione sporca e questo è dovuto alla sabbia (colori sul giallo e rosa) che viene “assegnata” in molte aree non costiere.

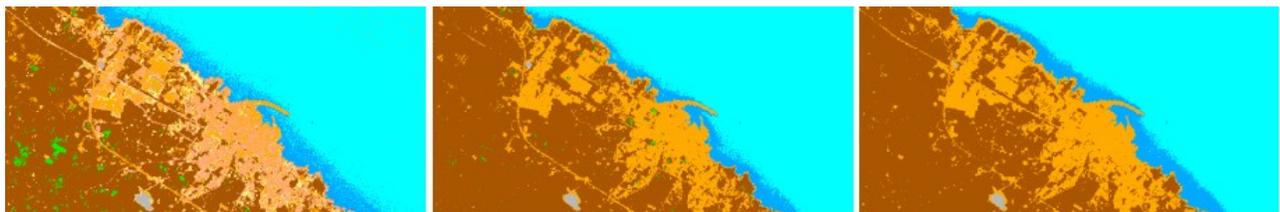


Fig. 86 Monopoli (BA) - MLC, SVM con kernel lineare, SVM con kernel RBF.

Nel caso di configurazioni SVM la mappa di output è definita molto meglio. Sulla costa però le aree con sabbia e con sabbia mista a roccia, vengono di frequente classificate come aree artificiali.

La support vector machine con kernel RBF rende meglio anche in relazione alla individuazione delle aree verdi e, come si nota in seguito, anche il dettaglio delle piccole aree edificate è meglio definito.

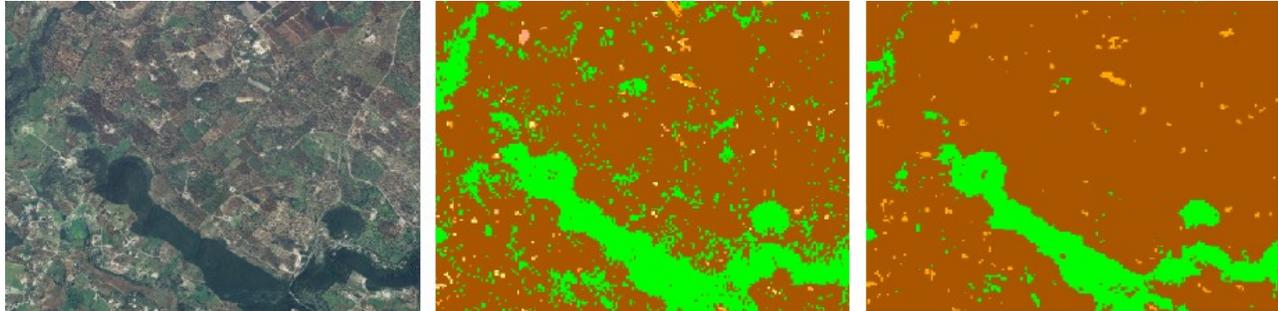


Fig. 87 Monopoli (BA) – Ortofoto, MLC, SVM con kernel RBF (aree verdi)

Passando alle 6 bande (solo la banda 6 è a 30 metri) e analizzando i risultati delle varie configurazioni nessuna soddisfa pienamente le attese e questo è dovuto ancora una volta alla difficoltà di discernere la sabbia con le aree urbane.

Analizzando i risultati di overall accuracy e del coefficiente kappa si possono notare alti valori per le configurazioni di SVM con kernel RBF.

METODI/parametri	Overall Accuracy	Kappa Coefficient
MLC	0,9431501	0,8415008
SVM Linear	0,9504182	0,8512935
SVM RBF	0,9625647	0,8894029
SVM RBF gamma=1	0,9713262	0,915732
SVM RBF cost=10	0,9705297	0,9133982
SVM RBF cost=100	0,974313	0,9247786
SVM RBF cost=1000	0,9788929	0,9382843
SVM RBF cost=2000	0,9800876	0,9417788
SVM RBF cost=3000	0,9801872	0,9420822
SVM RBF cost=10000	0,9812824	0,9452781
SVM RBF cost=100, gamma=1	0,9820789	0,9476313
SVM RBF cost=1000, gamma=1	0,9848666	0,9558683
SVM POLY degree=3	0,9348865	0,7908094
SVM POLY degree=5	0,9202509	0,7324812
SVM POLY degree=3 cost=100	0,9585822	0,8743769

Tab. 12 Parametri di accuratezza Aster – 8 classi – 6 bande

Nella figura 88 viene evidenziata un'area sulla costa che è caratterizzata da sabbia e sabbia mista a roccia. La MLC su questa piccola area classifica abbastanza bene ma il

resto del territorio, anche non costiero, risulta “sporcato” proprio dalla classe sabbia/roccia. Anche se la viabilità non è ben definita, forse il miglior compromesso si ottiene nel caso di configurazione SVM con kernel RBF e $cost=100$; nell'area cerchiata, la sabbia (color giallino) e la sabbia mista a roccia (color rosa chiaro) vengono individuate correttamente.

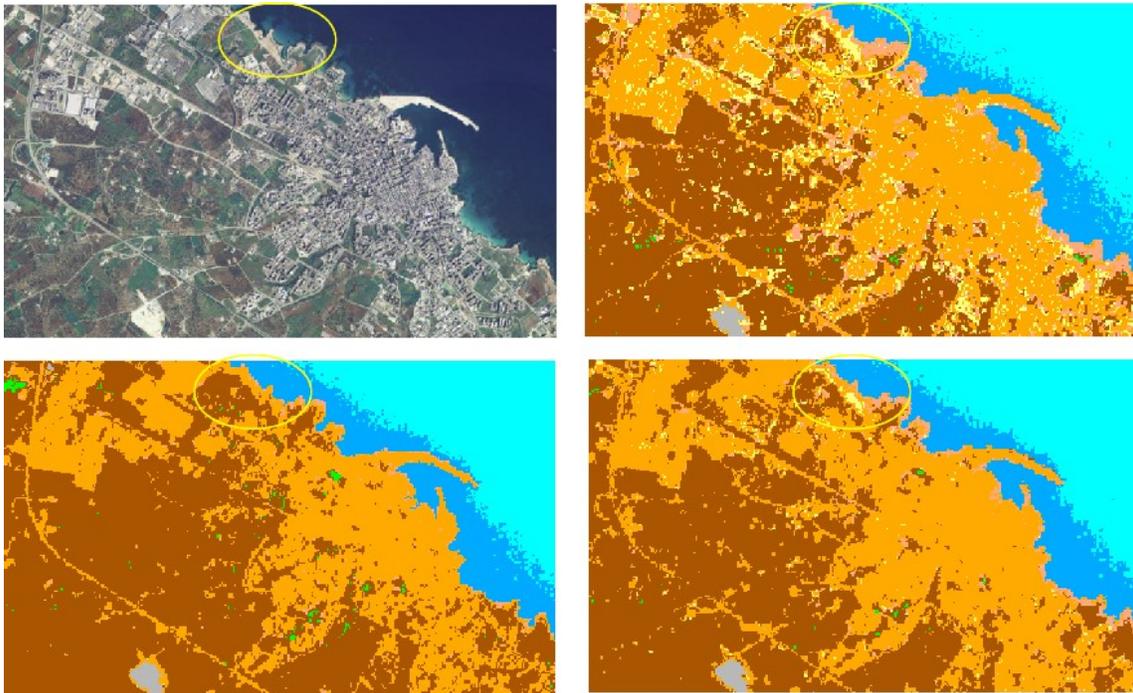


Fig. 88 Monopoli (BA) – Ortofoto, MLC (prima riga), SVM con kernel Lineare, e SVM con Kernel RBF $cost=100$ (seconda riga)

Nel caso delle 9 bande le considerazioni che possono essere fatte sono le stesse. Volendoci soffermare solo sulle classi relative alla sabbia si può notare che la questione migliora molto se si usano configurazioni di SVM con kernel RBF e parametro $cost$ maggiore (che, come detto più volte, è opportuno tenere basso).

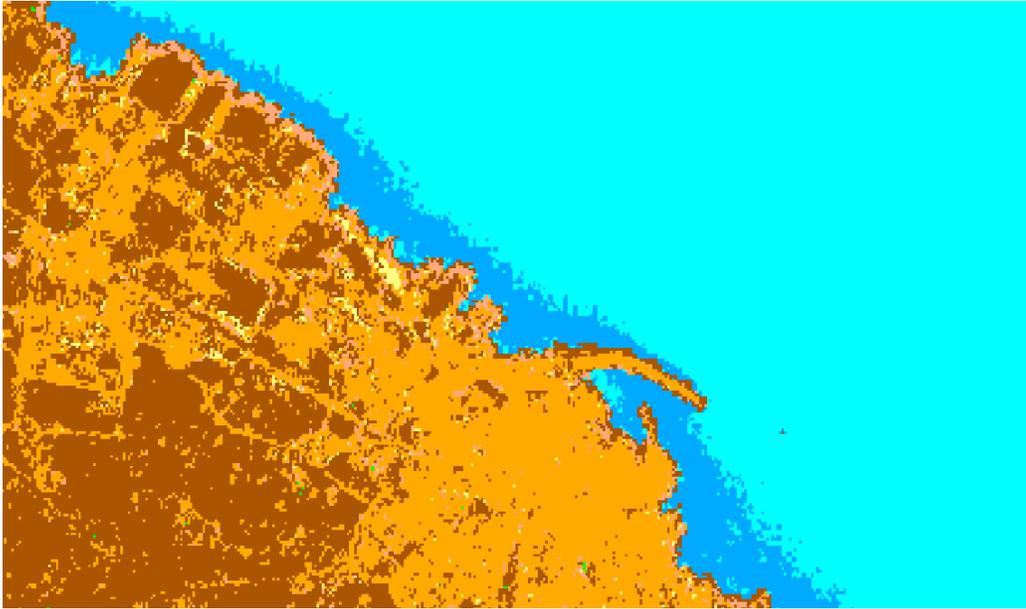


Fig. 89 Monopoli (BA) – Ortofoto, MLC, SVM con kernel Lineare, e SVM con Kernel RBF cost=100

Anche nel caso di uso delle 9 bande i valori migliori di K e di OA riguardano l'applicazione SVM e con il Kernel RBF.

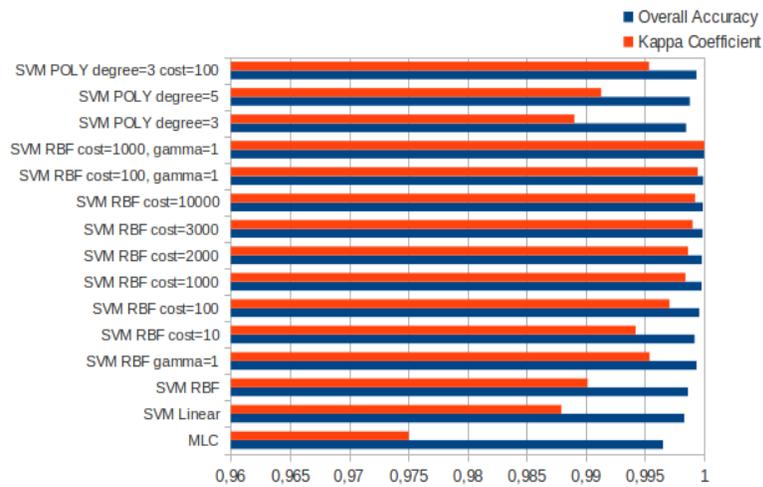


Fig. 90 Parametri di accuratezza Aster – 8 classi – 9 bande

A differenza della classificazione urbano/non urbano, l'utilizzo delle 9 bande non risulta essere peggiorativa (rispetto all'uso delle 3 o 6 bande) in questo caso. Inoltre si ottengono buoni risultati nella discriminazione della sabbia con il kernel RBF e con valore del parametro Cost più basso.

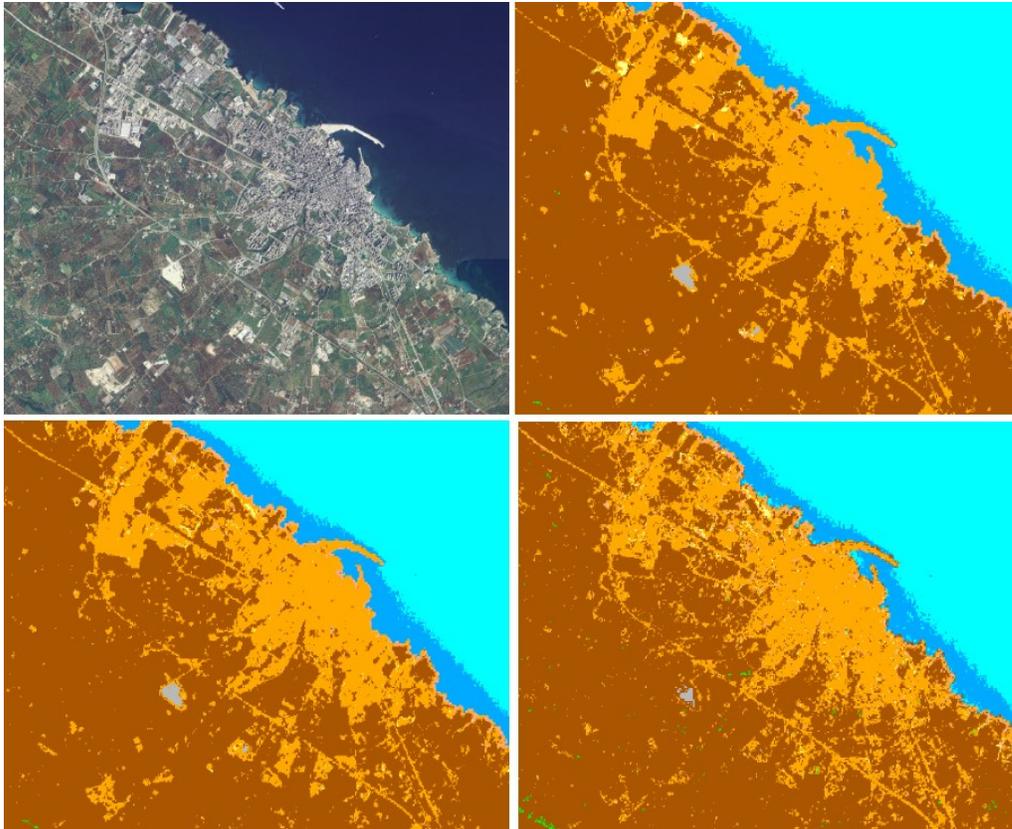


Fig. 91 Monopoli (BA) – ortofoto, SVM Linea (prima riga), SVM RBF, SVM RBF Cost=100 gamma=1 (seconda riga)

6.4.2.3 LANDSAT

Per l'applicazione con il dato Landsat sono state utilizzate tutte le bande con stessa risoluzione geometrica facendo solo una suddivisione tra la classificazione basata su 2 classi o 8 classi. In questo paragrafo sono esposti anche i dati relativi alle matrici di confusione (rappresentano un ulteriore elemento per la validazione di un classificatore).

Anche in questo caso i parametri di accuratezza generali mostrano valori più alti per la SVM con kernel RBF. Nel caso di kernel polinomiale i valori di Overall Accuracy sono confrontabili con i valori di kappa e si attestano intorno allo 0,5 – 0,6. In generale, per questo uso, l' SVM con kernel polinomiale non fornisce grandi risultati. I risultati che si ottengono con gli altri kernel e con MLC sono comparabili ma gioca un ruolo importante ancora una volta la classificazione delle aree costiere dove è presente la sabbia.

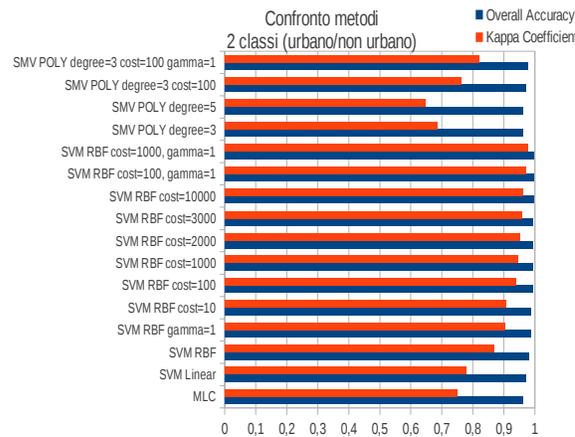


Fig. 92 Parametri di accuratezza Landsat – 2 classi

Le accuracy table (o matrici di confusione) forniscono, per ogni configurazione, indicazioni sulla accuratezza di ciascuna classe.

Ad esempio per la MLC, nel caso della classificazione con due classi, la classe 1 ha valore di producer accuracy pari a 0,86 e di user accuracy pari a 0,69. Infatti, 31 pixel della classe 1 (sample1) vengono predetti come classe 2.

Accuracy Table:

	Predicted 1	Predicted 2	Producer Acc
Sample 1	198.00	31.00	0.86
Sample 2	86.00	2607.00	0.96
User Acc	0.69	0.98	NA

Esaminando le altre accuracy table, nel caso di SVM con Kernel RBF e parametro $cost=10$, si hanno valori molto superiori con una Producer Accuracy pari a circa 0,93 e un valore di User Accuracy pari a circa 0,89 per la classe 1.

Anche in questo caso è utile porre attenzione nelle zone del territorio dove c'è presenza di sabbia.

L'area cerchiata nelle immagini seguenti rappresenta parte del territorio lungo la costa con presenza di sabbia, a volte mista a roccia, ma non con edifici e aree asfaltate.

E' possibile notare come la configurazione con kernel RBF e $cost=100$ porti ad un buon risultato su quella area e per l'individuazione delle strade. Questo conferma i valori dei parametri di accuratezza. La configurazione con kernel linear dà risultati peggiori rispetto al kernel RBF.

Da notare in basso a destra come la sabbia nel MLC venga classificata come urbano (con svm solo pochi pixel).

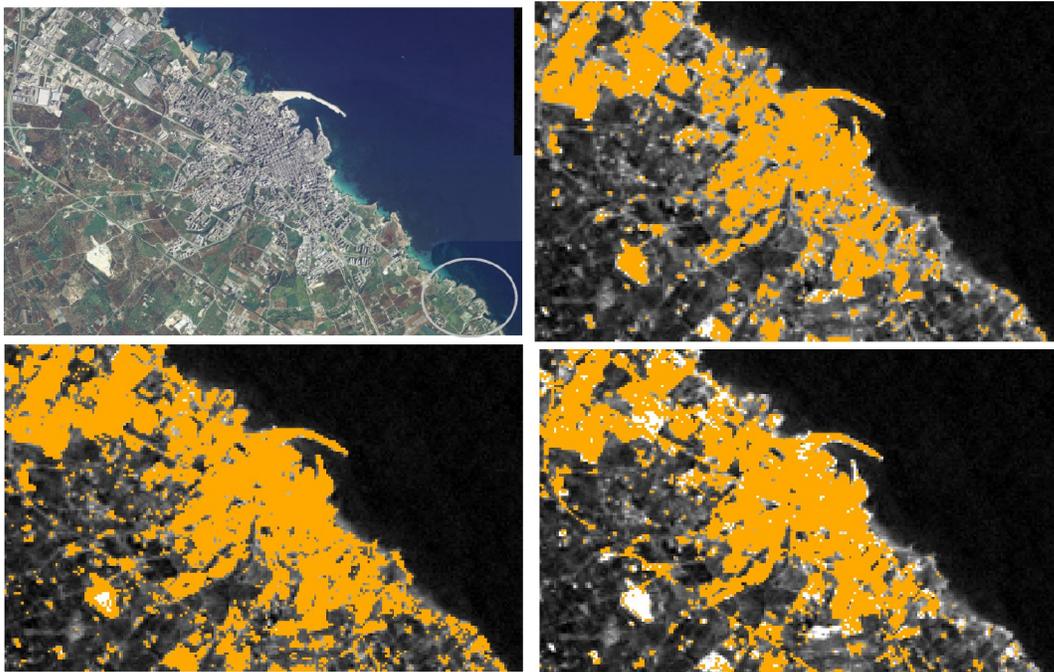


Fig. 93 Ortofoto Monopoli, SVM – Linear (prima riga), Maximum Likelihood, Fig. 4 SVM - RBF cost = 100

Facendo uno zoom sulla costa si notano bene le differenze.



Fig. 94 Zona costiera. Ortofoto, Maximum Likelihood, SVM con Kernel RBF e $cost=100$;

E' evidente di come la sabbia con SVM non venga inglobata nei pixel urbani.

8 CLASSI

Mediante l'uso di più classi i valori risultano alti in tutte le configurazioni. Tuttavia, come si vedrà in seguito, i valori relativi alla classe 1 (urbano-aree impermeabili) fanno la differenza nella scelta del classificatore più adeguato.

Nel caso di classificazione Maximum Likelihood vengono individuate bene le strade, c'è un eccesso di pixel classificati come sabbia e c'è una perdita di definizione di alcuni oggetti geometricamente ben definiti (come per esempio il molo).

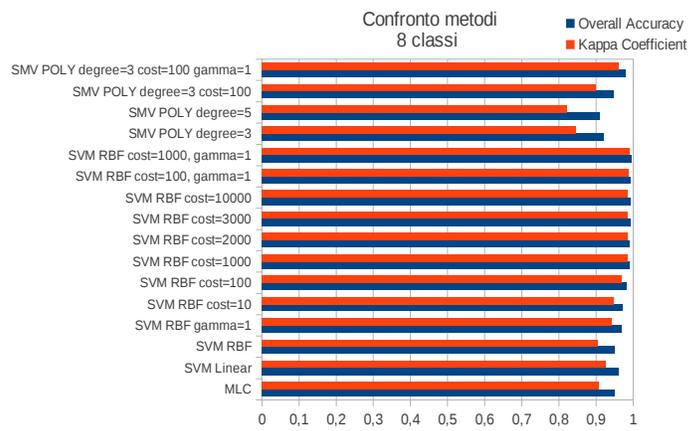


Fig. 95 Parametri di accuratezza Landsat – 8 classi

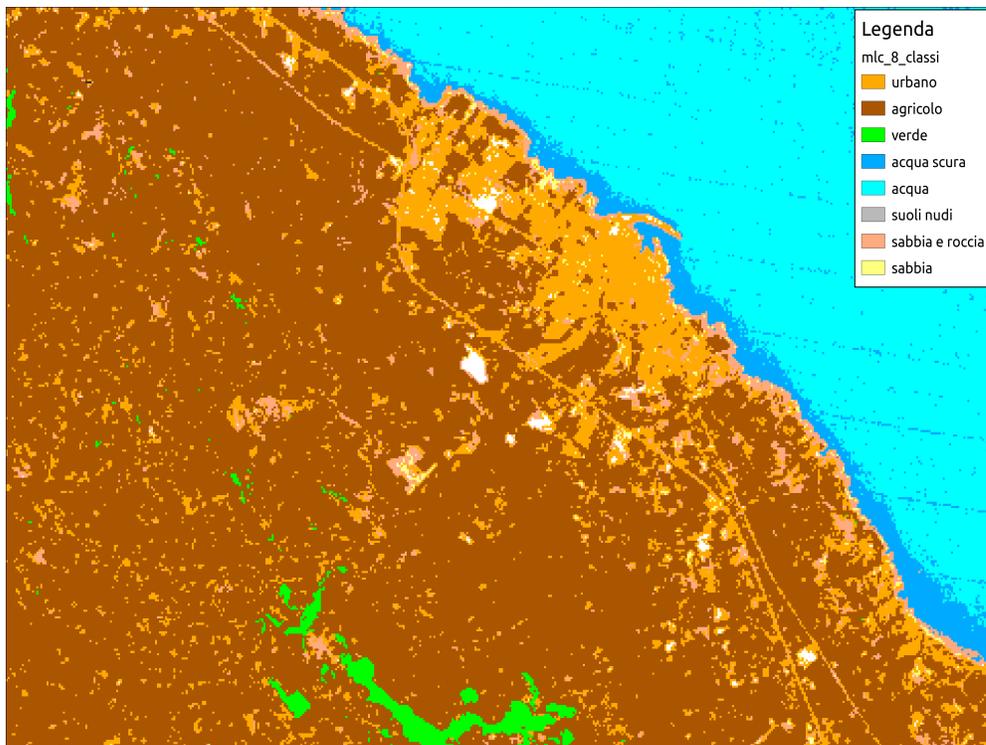


Fig. 96 Maximun Likelihood

Maximum Likelihood classifica abbastanza bene le strade ma anche SVM con kernel lineare dà buoni risultati sulla classe 1.

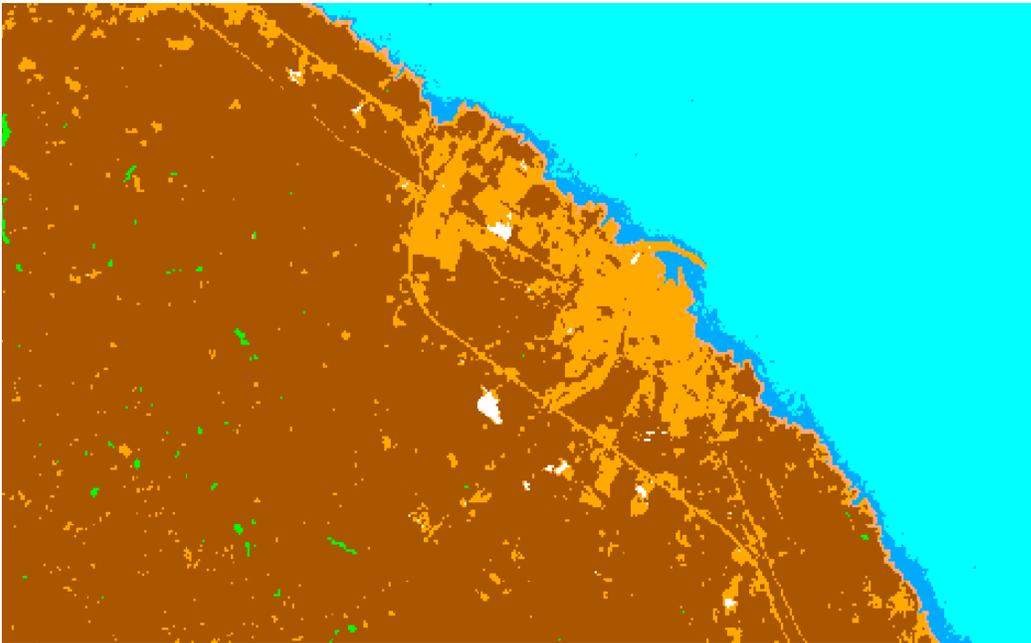


Fig. 97 SVM con Kernel Lineare

La configurazione SVM con kernel polinomiale fornisce ancora una volta scarsi risultati (al contrario del kernel RBF). Il comportamento dei suoli sabbiosi o sporchi di sabbia è nuovamente il principale problema di classificazione di uso del suolo. Queste classi hanno una migliore definizione soprattutto con il kernel RBF e con l'aumentare del parametro Cost.

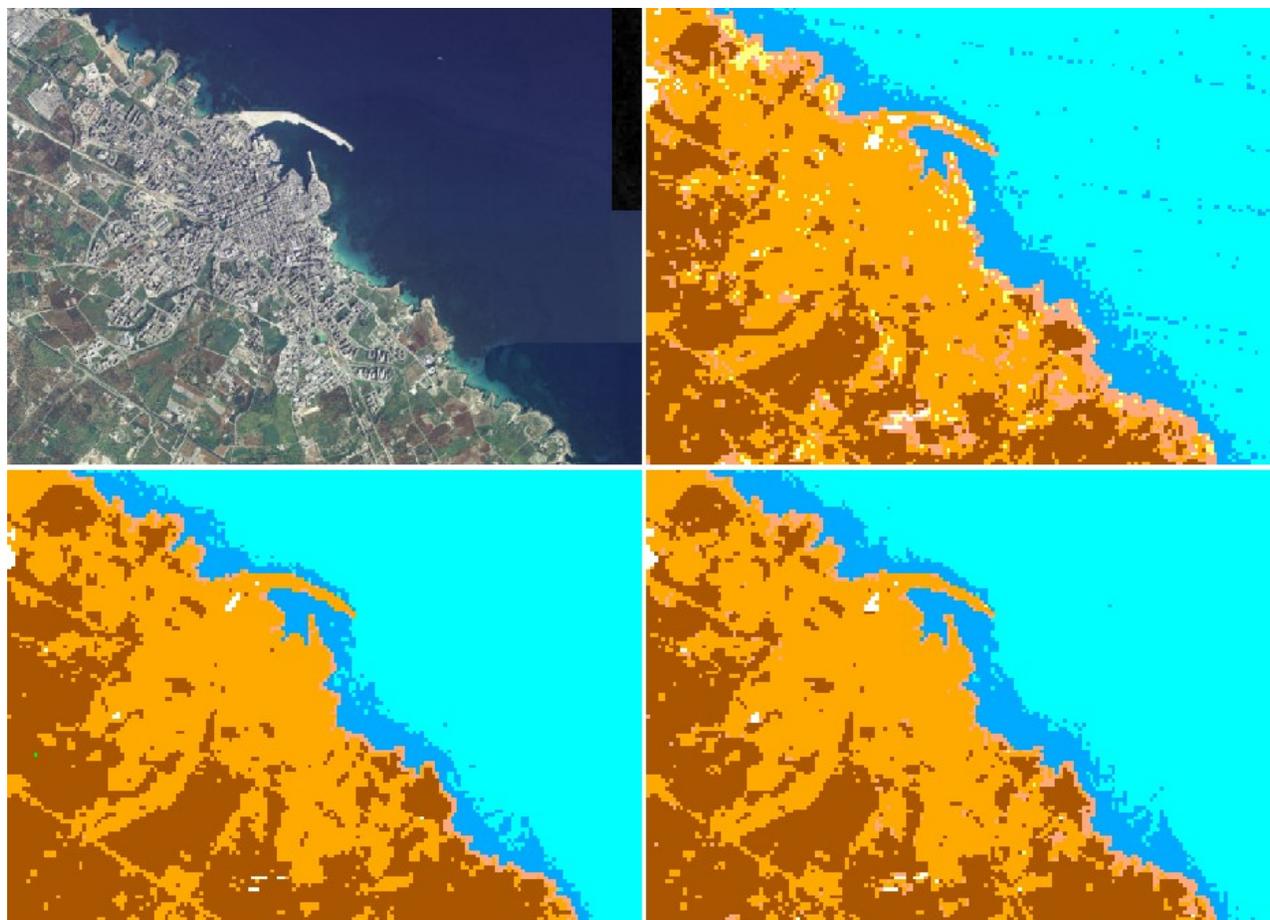


Fig. 98 Ortofoto, Maximum Likelihood (prima riga) SVM con Kernel Lineare, SVM con Kernel RBF e cost pari a 10(seconda riga)

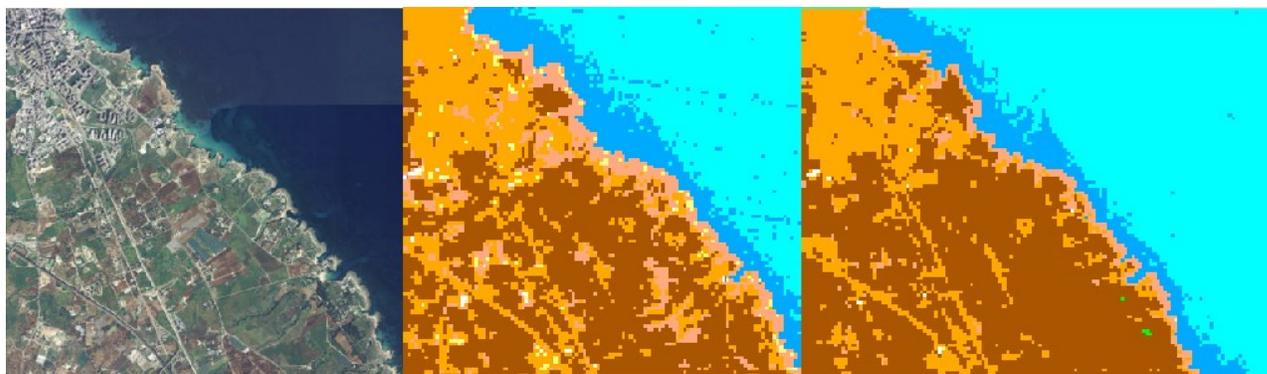


Fig. 99 Ortofoto, Maximum Likelihood, SVM con Kernel RBF e Cost pari a 10

Nella figura precedenti si può notare come lungo la costa Maximum Likelihood classifica troppe aree come sabbia mista a roccia (colore rosa). Il “giusto” compromesso si ottiene con SVM e Kernel RBF.

Come già visto per l'applicazione sulle due classi, la accuracy table può essere utile per fare ulteriori valutazioni. Prendendo come esempio la classe 1 (urbano-aree asfaltate) della MLC si notano valori un po' bassi di accuratezza; in particolare, 16 pixel della classe 1 (sample1) vengono predetti come classe 2, 13 come classe 6, 20 come classe 7 e 8 come classe 8. Invece 46 pixel delle ROI appartenenti ad altre classi(sample) vengono predetti come classe 1 (40 pixel della sample2, 2 pixel della sample 7 e 4 pixel della sample 8).

	Predicted 1	Predicted 2	Predicted 3	Predicted 4	Predicted 5	Predicted 6	Predicted 7	Predicted 8	Producer Acc
Sample 1	252,00	16,00	0,00	0,00	0,00	13,00	20,00	8,00	0,82
Sample 2	40,00	1947,00	0,00	0,00	0,00	3,00	19,00	2,00	0,97
Sample 3	0,00	1,00	54,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98
Sample 4	0,00	0,00	0,00	114,00	4,00	0,00	3,00	0,00	0,94
Sample 5	0,00	0,00	0,00	3,00	503,00	0,00	0,00	0,00	0,99
Sample 6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,00	0,00	1,00	0,97
Sample 7	2,00	5,00	0,00	3,00	0,00	1,00	38,00	5,00	0,70
Sample 8	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	11,00	0,58
User Acc	0,85	0,99	1,00	0,95	0,99	0,62	0,45	0,41	NA

Tab. 13 Accuracy Table Maximum Likelihood

Questo ci porta ad avere per Sample 1 un valore di Producer Accuracy pari a circa 0,82 e un valore di User Accuracy pari a circa 0,85 e ci permette di capire quale classe o quali classi “disturbano” la numero 1. Questa valutazione permette di fare diverse considerazioni a partire dal fatto che può essere un ottimo spunto per ottenere un miglioramento delle aree training.

Nel caso di SVM con Kernel RBF e parametro cost=10 si ha un valore di Producer Accuracy pari a circa 0,93 e un valore di User Accuracy pari a circa 0,89 per la classe 1.

	Predicted 1	Predicted 2	Predicted 3	Predicted 4	Predicted 5	Predicted 6	Predicted 7	Predicted 8	Producer Acc
Sample 1	288,00	17,00	0,00	0,00	0,00	1,00	3,00	0,00	0,93
Sample 2	10,00	1999,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,99
Sample 3	0,00	2,00	53,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,96
Sample 4	0,00	0,00	0,00	111,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,92
Sample 5	0,00	0,00	0,00	1,00	505,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Sample 6	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,00	0,00	0,00	0,83
Sample 7	7,00	7,00	0,00	4,00	0,00	0,00	36,00	0,00	0,67
Sample 8	13,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00
User Acc	0,89	0,99	1,00	0,96	0,98	0,89	0,82	NA	NA

Tab. 14 Accuracy Table SVM con RBF e cost=10

E' interessante notare cosa accade per le classi 7 e 8 (rispettivamente sabbia mista a roccia e sabbia); nel caso della MLC ci sono valori migliori per la classe sabbia e con SVM abbiamo addirittura valori pari a zero per la classe 8. Per questo ultimo caso su 19 pixel ROI classe sabbia, cinque vengono predetti come classe 7, ossia sabbia-roccia, uno come classe 2 (agricolo) e tredici come aree urbane.

Volendoci soffermare solo sulle classi relative alla sabbia si può notare che la questione migliora molto se ci usano configurazioni di SVM con kernel RBF e parametro cost maggiore.

	Predicted 1	Predicted 2	Predicted 3	Predicted 4	Predicted 5	Predicted 6	Predicted 7	Predicted 8	Producer Acc
Sample 1	291,00	12,00	0,00	0,00	0,00	1,00	4,00	1,00	0,94
Sample 2	5,00	2005,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00
Sample 3	0,00	0,00	55,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Sample 4	0,00	0,00	0,00	116,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,96
Sample 5	0,00	0,00	0,00	1,00	505,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Sample 6	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,00	0,00	0,00	0,97
Sample 7	6,00	5,00	0,00	3,00	0,00	0,00	40,00	0,00	0,74
Sample 8	2,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	14,00	0,74
User Acc	0,95	0,99	1,00	0,97	0,99	0,97	0,85	0,93	NA

Tab. 15 Accuracy Table SVM con RBF e cost=100

Nella figura seguente sono messe a confronto lo stato di fatto e due configurazioni SVM con cost pari a 10 e pari a 100. Aumentando il parametro cost si corre il rischio di andare in overfitting e, come si può notare, la sabbia viene correttamente individuata sulla costa ma abbiamo anche dei pixel (osservare le frecce) che “sporcano” l'immagine nell'entroterra.



Fig. 100 Ortofoto, SVM con Kernel RBF e cost 10 e cost 100.

La sabbia quindi gioca un ruolo fondamentale nel processo di classificazione e una delle possibilità che qui si potrebbe proporre è quella di adottare una classificazione SVM con Cost maggiore solo per l'individuazione delle classi 7 e 8 lungo la costa. Questi pixel

saranno poi sovrapposti ad una classificazione con una configurazione che dà buoni risultati nell'entroterra.

In ultima analisi si riportano alcune immagini relative alle aree verdi. Uno dei risultati migliori si ottiene con la configurazione SVM con Kernel RBF cost =10 e gamma =1.

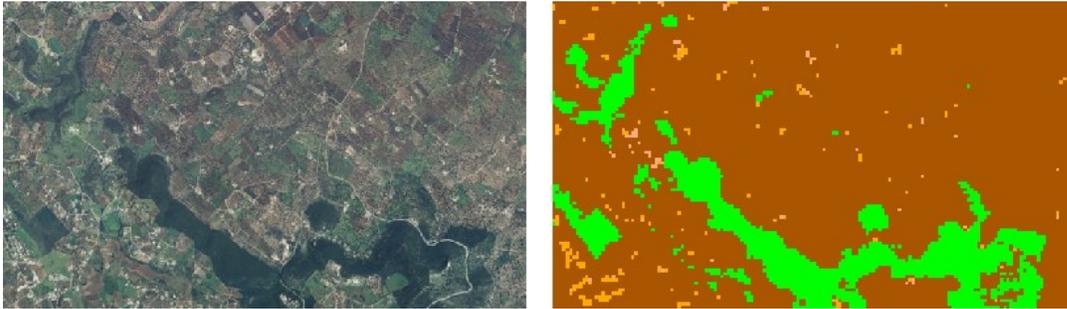


Fig. 101 Ortofoto, SVM con Kernel RBF cost=10 e gamma=1.

In definitiva, sia per Aster che per Landsat, la vicinanza spettrale tra la sabbia e gli ambienti urbani sono la complicazione principale per ottenere una suddivisione delle classi di uso del suolo “pulita”.

A seconda della classe esaminata una configurazione può dare risultati migliori rispetto ad un'altra e viceversa e risulta molto utile, a tal proposito, la matrice di confusione.

Le classificazioni e elaborazioni in questa applicazione sono state inserite all'interno di uno script basato sul software Grass GIS e su R-statistics e questo risulta molto utile innanzitutto in fase di testing.

Le mappe di output possono essere quindi analizzate insieme ai valori sull'accuratezza e, mediante la map-algebra, si possono fare scelte sulle singole classi prendendo, ad esempio, i pixel urbani dalla configurazione SVM con kernel RBF standard, i pixel della sabbia lungo la costa dalla configurazione SVM kernel RBF cost=10 etc.

L'uso di più bande in generale porta dei miglioramenti alla classificazione. Fa eccezione però l'uso di 9 bande nel caso delle due classi urbano/non urbano.

La SVM con il Kernel RBF rappresenta, sia per il dato Aster che per il Landsat, quasi sempre la scelta migliore, anche se, a seconda della classe di uso del suolo su cui si pone maggior attenzione, una configurazione può dare risultati migliori rispetto ad un'altra e viceversa.

7 CONCLUSIONI

L'impulso iniziale di questa tesi è stata la ricerca di integrazione tra i Sistemi Informativi Geografici e il Telerilevamento per lo studio del territorio. Si tratta di due scienze che hanno lo stesso target ma, nella maggior parte delle applicazioni territoriali, collimano solo marginalmente. Questo stride con i progressi tecnologici avvenuti nell'ultimo decennio in ambo i campi.

La pianificazione territoriale deve cercare di supportare le scelte utilizzando quadri conoscitivi prodotti grazie alle nuove frontiere di analisi e gestione del dato.

L'utilizzo dei Sistemi Informativi Geografici nasce e si sviluppa prevalentemente tra i geografi con un uso finalizzato ad un approfondimento dell'analisi dei fenomeni territoriali.

Le singole analisi settoriali, molto spesso basate su rilievi classici, non riescono ad evidenziare la moltitudine di dinamiche in atto sul territorio.

Il Telerilevamento, che ha nel tempo portato notevoli miglioramenti nelle immagini con risoluzione spettrale, spaziale e temporale dei dati sempre maggiore, permette una interpretazione del dato che va oltre la composizione RGB.

L'utilizzo di dati telerilevati è di estrema importanza e una disciplina come la pianificazione territoriale, che programma il territorio per gli anni futuri, deve necessariamente avvicinarsi al dato multispettrale. Ad esempio, l'utilizzo delle bande multispettrali fornite dai vari sensori satellitari, come TM Landsat, ASTER, WorldView-2 si sono rivelate estremamente utili per identificare le aree impermeabilizzate,

consentendo quindi su base regionale e/o comunale di avere informazioni dettagliate e quindi di classificare le aree non solo in base alla diversa densità urbana, ma anche e soprattutto di calcolare (grazie al confronto di dati acquisiti in diversi periodi di tempo) l'indice di consumo di suolo. Tale indicatore è di fondamentale importanza poiché fornisce informazioni sullo stato attuale del suolo e permette di determinare anche preziose mappe sulla evoluzione temporale del consumo dello stesso. Questo aiuta quindi a comprendere sia lo stato di fatto che l'effetto delle scelte e delle azioni implementate rispetto allo sviluppo sostenibile del territorio.

Oltre alle potenzialità computazionali legate alla disponibilità di dati multispettrali, un altro aspetto molto importante ed utile per la pianificazione del territorio è la multi temporalità del dato, che consente il monitoraggio continuo del territorio e può agevolmente supportare la costruzione e/o verifica di modelli di simulazione.

E' anche rilevante sottolineare che avere a disposizione dati satellitari raccolti ciclicamente può consentire, ad esempio, alle amministrazioni di effettuare un'azione di controllo che si sviluppa per tutta la fase di attuazione delle disposizioni del piano urbanistico.

Inoltre, la disponibilità di serie storiche acquisite sistematicamente per la stessa porzione di territorio, come ad esempio è dagli anni 70 per i dati TM, può consentire di validare i modelli di simulazione e quindi di ottimizzarli in modo da renderli utili sul piano operativo per prevedere effetti e ripercussioni che gli interventi proposti dal piano possono avere sul territorio.

In questo contesto il tema della dispersione insediativa, argomento cardine della tesi, merita molta attenzione e, così come tanti altri fenomeni territoriali, è oggi affrontabile in modo approfondito mediante le tecniche di analisi spaziali e le nuove tecnologie.

In tale scenario va ribadito che sia il monitoraggio continuo del territorio che l'utilizzo di modelli di simulazione "operativamente testati" possono non solo fornire informazioni sullo stato di attuazione del piano approvato ma, in un'ottica dinamica della

pianificazione, possono anche suggerire varianti qualora le disposizioni già pianificate possono essere altresì superate dall'evoluzione vocazionale del territorio.

Anche se è evidente il forte contributo dei dati satellitari, il telerilevamento risulta ancora oggi molto distante dalle pratiche di pianificazione territoriale. E' indubbio che alla crescente disponibilità di dati da satellite ed al continuo sviluppo, qualitativo e quantitativo di sensori per il telerilevamento, non è seguito un effettivo aumento dell'utilizzazione di tali dati in ambito operativo, in generale, e per la pianificazione in particolare. Questa limitazione deriva da numerosi elementi, a partire dalla mancanza di prodotti standardizzati, specificatamente realizzati per la pianificazione urbanistica ed ottenuti da processi ugualmente standardizzati e quindi replicabili nel tempo e nello spazio.

Ad esempio, standardizzazione ed automazione potrebbero essere rapidamente implementate per produrre tematismi ad elevato contenuto informativo, come le carte di uso del suolo e le mappe di consumo di suolo, che sono ampiamente utilizzate sia in ambito urbanistico che ambientale.

Pertanto, SIT e Telerilevamento possono contribuire con forza allo studio del territorio, mettendo il pianificatore nelle condizioni di poter fare scelte di piano coerenti con i reali bisogni dell'ambiente.

Questo lavoro ha cercato di proporre nuovi approcci per la gestione del dato e per la sua elaborazione al fine di comprendere al meglio un fenomeno in tutte le sue sfaccettature e di poterlo monitorare nel tempo.

Le metodologie qui proposte e le elaborazioni effettuate, con una robusta integrazione dei dati, erano impensabili fino a qualche anno fa. La densità di kernel, le tecniche di geostatistica, le operazioni di map algebra, insieme alla change detection, alla classificazione supervisionata, permettono di effettuare analisi spaziali sempre più approfondite, rilevando le tendenze in atto sul territorio in maniera più efficace.

Un altro aspetto fondamentale di questa tesi è stato quello di definire metodologie che fossero basate su concetti di GIS, Telerilevamento, Open Data e sull'uso di tecnologie

free e opensource. Difatti, ogni fase del processo è stata realizzata con software liberi e con dati gratuiti. Il sistema operativo (Linux Ubuntu) e i software (GRASS GIS, Quantum GIS e R-project) sono di natura open source, mentre i dati aerofotogrammetrici usati, i dati Aster e Landsat sono scaricabili liberamente. Questo aspetto risulta essere molto importante poiché non pone nessuna limitazione tecnologica/legale e consente a chiunque di poter replicare le elaborazioni qui proposte.

Passando ai risultati ottenuti, in linea generale, è possibile affermare che la variazione della struttura urbana nel tempo può essere determinata quantitativamente utilizzando principalmente immagini satellitari e, qualora disponibili, dati cartografici ancillari. Si è constatato che, analizzando e confrontando immagini a diverse date, si può esaminare alla scala vasta il processo di crescita urbana e si può individuare e monitorare la dispersione insediativa. L'autocorrelazione spaziale, la change detection e l'uso di diversi classificatori aggiungono ulteriori elementi per la caratterizzazione del territorio e per la riconoscibilità dei fenomeni da studiare.

La possibilità di lavorare con gli ambienti GIS e Telerilevamento a “contatto” diviene una opportunità utile per migliorare gli effetti delle tecniche di analisi spaziale. I due settori possono oggi considerarsi maturi per potersi fondere, magari dando origine ad una nuova disciplina.

Proprio per questi motivi, l'esigenza di intraprendere studi sul territorio urbanizzato richiede l'adozione di nuove tecniche e nuovi algoritmi che superino i tradizionali processi di classificazione pixel based.

Il quadro metodologico sin qui definito induce alla rivisitazione del processo di classificazione nelle sue diverse fasi e a sperimentare nuove metodologie al fine di approfondire le tematiche in oggetto ed aumentare il potere discriminante in relazione alle tipologie di oggetti da riconoscere e classificare.

8 BIBLIOGRAFIA

- Alberti M., Solera G., Tsetsi V. (1994). *La città sostenibile*, F. Angeli
- Anselin, L., and A. Getis., (1992). *Spatial Statistical Analysis and Geographic Information Systems*. *The Annals of Regional Science*, 26, pp. 19-33.
- Athanasios Dermanis (2002). *Telerilevamento-informazione territoriale mediante immagini da satellite*. C.E.A. Milano
- Bonelli T., Fratino U., Romano L.(2010). *Il complesso rapporto tra la città di Bari e le lame, uno sguardo al passato per un diverso futuro*.
- Boscacci F., Camagni, R. (1994). (a cura di), *“Tra città e campagna”*. *Periurbanizzazione e politiche territoriali*, Bologna, 1994.
- Bailey, T. C., Gatrell A. C., (1995). *Interactive spatial data analysis*. Prentice Hall.
- Borruso, G., (2003). *Network Density and the delimitation of Urban Areas*. *Transaction in GIS*, 7(2), pp. 177-191.
- Borruso G., Schoier G. (2004). *Density Analysis on Large Geographical Databases. Search for an Index of Centrality of Services at Urban Scale*. In Gavrilova M. L., Gervasi O., Kumar V., Laganà A., Mun Y. and Tan K. J. (eds.), *Lecture Note in Computer Scienze Springer-Verlag, Berlin*, ISBN 3-540-22056-9
- Brivio, P.A., Lechi G., & Zilioli E. (2004). *Principi e metodi di Telerilevamento*. Torino: CittàStudi Edizioni.
- Camagni R. (1999). *La pianificazione sostenibile delle aree periurbane*. Bologna.
- Camagni R., Gibelli M.C., Rigamonti P. (2002). *I costi collettivi della città dispersa*. Firenze.
- Clementi A., Palermo P. C., Dematteis G., (1996). *Le forme del territorio italiano*. 2 voll., Laterza, Bari.
- Consiglio d’Europa (1972), *Carta Europea del suolo*.
- Congalton R.G., Mead R.A., (1983). *A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49: 69-74.
- Congalton, R. G., (1988). *A Comparison of Sampling Schemes Used in Generating Error Matrices for Assessing the Accuracy of Maps Generated from remotely Sensed Data*. *Photogrammetric Engineering*

and Remote Sensing, Vol. 54, No. 5, pp. 593-60

Dematteis G., (2003). Città diffusa, periurbanizzazione e piani strategici, In: La diffusione urbana: tendenze attuali, scenari futuri, Bertuglia C.S.; Stanghellini A.; Staricco L., FrancoAngeli (ITA), pagine da 196 a 208

Dixon, B., Candade, N., (2008). Multispectral landuse classification using neural networks and support vector machines: one or the other, or both? International Journal of Remote Sensing 29 (4), 1185-1206.

FAI e WWF (2012). TERRA RUBATA - Viaggio nell'Italia che scompare -Le analisi e le proposte di FAI e WWF sul consumo del suolo

Josef Frisch G. F., (2005). 30 ha/giorno. Le politiche di contenimento delle aree urbane in Germania.

Fichera C., Modica G., Pollino M., (2011). GIS and remote sensing to study urban-rural transformation during a fifty-year. Lecture Notes in Computer Science LNCS, Volume 6782, pp. 237-252, 2011

Gatrell, A. C., Bailey, T. C., Diggle, P. J., Rowlingson, B. S., (1995). Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology. Transaction of institute of British Geographer, 21, pp. 256-271, Royal Geographical Society.

Gatrell A., (1994). Density estimation and the visualisation of point patterns. In: Hearnshaw H. M. and Unwin D. (eds), Visualisation in Geographical Information Systems, Chichester, Jhon Wiley and Sons, pp. 65-75.

Gomasasca M. A., (1997). Introduzione a Telerilevamento e GIS per la gestione delle risorse agricole e ambientali. ArteStampa Daverio (Va), Italia.

Gomasasca M.A., (2003). L'interpretazione delle immagini telerilevate. Bollettino SIFET 3/2003.

Guerois, M., Pumain, D., (2001). Urban sprawl in France (1950-2000). Franco Angeli.

Las Casas G., Murgante B., Nolè G., Pontrandolfi P., Sansone A., (2005). L'uso della Geostatistica per la delimitazione degli ambiti periurbani della Provincia di Potenza.

Lasaponara R. , Masini N. (2006). Identification of archaeological buried remains based on Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from Quickbird satellite data, IEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 3, 3, 325-328 (ISI*).

Lasaponara R., Masini N. (2006). On the potential of Quickbird data for archaeological prospection, International Journal of Remote Sensing, vol.

27, n15-16, (2006), 3607-3614.

Laurini R., Murgante B.(2008). Interoperabilità semantica e geometrica nelle basi di dati geografiche nella pianificazione urbana, in Murgante B. (a cura di), L'informazione geografica a supporto della pianificazione territoriale, pp. 229-244, Franco Angeli, Milano

Lanorte A., Danese M., Lasaponara R., Murgante B., (2013). Multiscale mapping of burn area and severity using multisensor satellite data and spatial autocorrelation analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Elsevier, Volume 20, Pages 42-51 doi:10.1016/j.jag.2011.09.005, 2013.

Las Casas G., (1992). Geografical Information System e valutazione del paesaggio sub-urbano. Atti del seminario "La gestione delle risorse ambientali nel progetto metropolitano", Cagliari.

Lechi G.(1999). Dispense del "Corso di Telerilevamento" Politecnico di Milano

Mazzeo G., (2009). Dall'area metropolitana allo sprawl urbano: la disarticolazione del territorio, TeMa 04.09, Napoli.

Mesev, V. (2007). *Integration of GIS and remote sensing*. Chichester, West Sussex ; Hoboken, NJ: Wiley.

Milton, E.J. (2001) Review of 'Mather, P.M., (1999). Computer processing of remotely-sensed images. An introduction. Chichester: Wiley.'. *Progress in Physical Geography*, 25, (1), 145-146.

Mountrakis, G., Jungho Im, Ogole C., (2010). Support vector machines in remote sensing: A review

Murgante B., Las Casas G., Danese M. (2007). The periurban city: geostatistical methods for its definition. *Rif. Editoriali: in Rumor M., Coors V., Fendel E. M., Zlatanova S. (Eds), Urban and Regional Data Management*, Taylor and Francis, London, ISBN: 978-0-415-44059-2

Murgante B., Las Casas G., Pontrandolfi P., Danese M.(2006). The use of spatial statistic for locating the periurban fringe. *Proceedings of European Urban Research Association (EURA) conference Warsaw, Poland, May 11-14, 2006.*

Murgante B., Las Casas G., Danese M. (2008). The periurban city: Geo-statistical methods for its definition", Coors, Rumor, Fendel & Zlatanova (eds) *Urban and Regional Data Management*, Taylor & Francis Group, London, 473-485, 2008.

Neteler, M., Mitasova H. (2004). *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. Second Edition. Boston: Kluwer Academic Publishers/Springer.

O'Sullivan D, Turner A, (2001). Visibility graphs and landscape visibility analysis. *International Journal of Geographical Information Science* 15(3):221-237

Pei, T., Zhu, A., Zhou, C., Li, B., Qin, Chengzhi (2006). A new approach to the nearest-neighbour method to discover cluster features in overlaid spatial point processes. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2), pp. 153-168, Taylor & Francis.

R. Harris, R., Sleight, P., Webber, R., (2005). *Geodemographics, GIS and Neighbourhood Targeting*. John Wiley & Sons.

Salzano E.(2004). A proposito di città dispersa. In [:http://eddyburg.sigis.net/article/articleview/535/1/15](http://eddyburg.sigis.net/article/articleview/535/1/15),

Stallman R. (2002). *Free Software, Free Society: The Selected Essays of Richard M. Stallman*. Editore: Joshua Gay

Stillwell, J., Clarke, G., (2003). *Applied GIS and Spatial Analysis*. John Wiley & Sons.

Thayer, W.C., Griffith, D.A., Goodrum, P.E., Diamond, G.L., Hassett, J.M., (2003). Application of Geostatistics to Risk Assessment. *Risk Analysis*. 23(5), pp. 945-960.

Thouret, J., (1999). Urban hazards and risks; consequences of earthquakes and volcanic eruptions: an introduction. *GeoJournal*. 49, pp. 131-135, Kluwer Academic Publishers.

Tobler, W. R., (1970). A Computer Model Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, 46, pp. 234-240.

Van Den Berg, L., Wintjes, A. (2000). New 'rural lifestyle estates' in The Netherlands. *Landscape and Urban Planning*, 48(3-4), Elsevier.

Zhu, G., Blumberg, D.G., (2002). Classification using ASTER data and SVM algorithms; The case study of Beer Sheva, Israel. *Remote Sensing of Environment*.