



## Il Telerilevamento

### Dalle analisi ambientali alla gestione del territorio

■ Gli sviluppi nell'uso del Telerilevamento sono sempre più promettenti, ed al momento le attese sono in parte soddisfatte dai continui progressi scientifici che verificano e confermano le potenzialità dei sistemi, sia che utilizzino dati da satellite ad alta risoluzione nell'ottico, che sensori attivi in banda radar, oltre alle acquisite applicazioni del Telerilevamento aereo.

Risulta essere molto importante definire il tema che si vuole affrontare ed il problema che si vuole risolvere per comprendere quali siano i possibili contributi del Telerilevamento ed i suoi limiti. E' fondamentale ricordare che le immagini telerilevate devono essere sempre supportate da informazioni e conoscenze territoriali che consentono una corretta interpretazione del fenomeno oggetto di studio.

Il Telerilevamento da solo può dare risposte decisive sul perché di un fenomeno o di una certa situazione territoriale. E' comunque ormai comunemente definito ed accettato che le immagini da satellite e le informazioni in esse contenute debbano essere parte di Sistemi Informativi Territoriali che, oltre a georeferenziare le immagini, integrino cartografia, topografica e tematica, banche dati, informazioni territoriali di varia natura e relativi sistemi di gestione e di supporto alle decisioni. Le peculiarità sinottiche, di ripetitività e di contenuto multispettrale del Telerilevamento contribuiscono nel migliorare le informazioni da utilizzare nei sistemi informativi, unitamente alle capacità multitemporali, a scale più o meno di dettaglio in funzione della riso-

luzione geometrica dei sensori.

Il limite più evidente ad una più ampia diffusione dei dati telerilevati è rappresentato dal costo delle immagini. I notevoli investimenti operati dalle Agenzie Spaziali NASA-USA, CNES-Francia, ESA-Europa, NASDA-Giappone, NRSA-India, DARA-Germania, da Russia, Canada etc., non hanno avuto la ricaduta attesa proprio per effetto dell'alto costo dei dati. Si stima che solo l'1% delle informazioni raccolte da satellite sia utilizzato per studi territoriali ed ambientali nel mondo.

Per questo la CE ha promosso il Programma CEO (*Centre for Earth Observation*), con sede nel Centro Comune di Ricerca di Ispra (VA). Il principale obiettivo del CEO è contribuire alla creazione di una rete coordinata e decentralizzata di Osservazione della Terra, *European Earth Observation System (EEOS)*, per accrescere l'utilizzo ed il valore dei dati di Osservazione della Terra, *Earth Observation (EO)*. Il CEO sta promuovendo iniziative per fornire servizi su misura per l'utente, utilizzando le possibilità esistenti per promuovere EO in Europa.

Il CEO è nato sulla base delle seguenti considerazioni:

- nel futuro il numero di satelliti nello spazio aumenterà producendo terabytes di dati alla settimana
- i dati telerilevati devono essere resi disponibili e convertiti in informazioni per l'utente
- l'attuale uso dei dati rimane poco sviluppato in confronto agli investimenti nello spazio
- i dati telerilevati sono elaborati ad un basso livello
- nessuna organizzazione ha la responsabilità completa di assicurare lo sviluppo dell'utilizzo dei dati telerilevati.

La Comunità Europea si è prefissa lo scopo di creare una rete attiva e flessibile di utenti che si autosostenga e sia capace di manipolare grandi quantità di dati EO e dei relativi dati non EO. Sono obiettivi della CEO la comunicazione tra gli utenti, prodotti di alto livello, standardizzazione dei dati ed assicurazione di qualità, decentralizzazione degli archivi dei dati, visibilità dei servizi EO a consulenza esperta.

La situazione dovrebbe profondamente cambiare con l'avvento dei satelliti progettati, costruiti e gestiti da compagnie private (*EarthWatch Inc.* per i satelliti *Early Bird* e *Quick Bird*, *Orbimage OSC* per *Orb-Wiew-1* e *Space Imaging Inc.* per *Spa-*

*ce Imaging*) rendendo molto più economico l'accesso ai dati.

Il fatto di poter acquisire immagini su superfici più piccole solo per specifiche aree di interesse consentirà di ridurre il costo, definito per numero di pixel o unità di superficie e non più per immagine, evitando l'acquisizione di scene molto grandi spesso non di interesse nella loro integralità da parte dell'utente.

### Definizione di Telerilevamento

Nell'uso attuale il termine Telerilevamento, o Remote Sensing, indica l'acquisizione a distanza di dati riguardanti il territorio e l'ambiente nonché l'insieme dei metodi e delle tecniche per la successiva elaborazione e interpretazione.

Il principio del Telerilevamento si basa sulla capacità di differenziare il maggior numero possibile di elementi o oggetti sul territorio (suolo, vegetazione, acqua, urbanizzato, ecc.) cercando di descriverne le caratteristiche spettrali alle diverse lunghezze d'onda a cui sono sensibili i diversi sensori, compatibilmente con la loro risoluzione spaziale.

La raccolta e la distribuzione delle informazioni è resa possibile dallo sviluppo delle tecniche relative ai sensori, alla trasmissione a distanza dei dati ed alla loro elaborazione. I sensori consentono la misura a distanza, basata essenzialmente sul comportamento delle superfici dei corpi relativamente alle onde elettromagnetiche nel visibile, nell'infrarosso e nelle microonde. Tali misure sono indirizzate al riconoscimento indiretto della struttura degli elementi territoriali o al rilevamento di alcune caratteristiche fisiche come, ad esempio, la temperatura o come la distribuzione spaziale di un elemento. In questo senso il Telerilevamento consente oltre ad un'analisi qualitativa e descrittiva delle immagini anche un'analisi quantitativa eseguibile, a volte, automaticamente.

Le misure di calibrazione da effettuare a terra per sfruttare pienamente le informazioni telerilevate sono generalmente relative alle condizioni fisiche dell'atmosfera, dell'acqua o del terreno o, in taluni casi, come per l'inquinamento, a misure fisico-chimiche delle stesse.

Un elemento importante per valutare l'utilità delle misure è rappresentato dal tempo con il quale queste vengono messe a disposizione dell'utente; vi sono infatti

Tabella 1. Regioni spettrali utilizzate nel Telerilevamento (in micron):

Ultravioletto (UV)	0,01	-	0,380	µm
Luce Visibile (V)	0,38	-	0,75	µm
Infrarosso Vicino (VIR)	0,75	-	3,0	µm
Infrarosso Medio (MIR)	3,0	-	6,0	µm
Infrarosso lontano o Termico (TIR)	6,0	-	20,0	µm
Microonde (MW) RADAR	0,1	-	100	cm

utilizzazioni che richiedono informazioni quasi in tempo reale, come nel caso del controllo dell'inquinamento; ve ne sono altre, invece, come la cartografia tematica, che necessitano di aggiornamenti differiti nel tempo. Questo elemento discriminante incide ovviamente sui mezzi e sui metodi di trasferimento delle informazioni e di elaborazione e, in ultimo, sul costo delle installazioni.

Il campo dello spettro delle onde elettromagnetiche può essere suddiviso, per comodità operativa, in regioni, a seconda della lunghezza d'onda (tabella 1).

I sistemi RADAR (*Radio Detection And Ranging*) rispetto ai sensori ottici, che utilizzano il Sole quale sorgente di radiazione esterna, sono essi stessi la sorgente di energia. Sono pertanto detti sistemi attivi ed il segnale, trasmesso dall'antenna verso la superficie terrestre e ricevuto sempre tramite l'antenna stessa, è costituito dall'energia più o meno diffusa (*scattered*) verso il sensore dagli elementi nella scena, an-

tropici o naturali

L'energia elettromagnetica emessa dal Sole viene riflessa dalla superficie terrestre nel visibile e nell'IR vicino, mentre viene emessa e riflessa nell'infrarosso medio ed emessa nell'IR-lontano dalla Terra.

### Firma spettrale

I sensori per lo studio delle risorse terrestri non effettuano 'fotografie' della superficie, ma misurano l'energia riflessa dei vari corpi presenti al suolo; lo scopo del Telerilevamento è riuscire a stabilire una corrispondenza tra la quantità e la qualità della energia riflessa e la natura o lo stato dei corpi o delle superfici dai quali proviene, a seconda delle varie lunghezze d'onda, tracciando delle *firme spettrali*.

Per poter affrontare queste problematiche in modo operativo spesso si ricorre a immagini provenienti da più sensori, ciascuno più adatto a sviluppare e conoscere un particolare aspetto del problema. Il maggior contributo ai fini di mo-

onitoraggio della superficie terrestre è stato offerto nell'ultimo ventennio da sistemi satellitari quali Landsat e SPOT, oggi affiancati da numerosi nuovi satelliti (tabelle 2 e 3). Oltre a USA, Russia, Francia, Giappone e Comunità Europea, anche Canada, India, Israele hanno costruito piattaforme satellitari con propri sensori e tecnologia (Gomarasca, 1992; Jemma e Cardarelli, 1995).

### Sviluppi futuri

Nel futuro ci si troverà di fronte a un notevole incremento del numero dei satelliti in orbita e soprattutto dei satelliti commerciali ad alta risoluzione. Le caratteristiche fondamentali di questi nuovi sistemi saranno non solo le elevate risoluzioni al suolo, ma anche passaggi più frequenti, con angoli di vista fino a 30°-45°.

Nel primo caso, ad esempio, i dati acquisiti nel pancromatico stanno passando da una risoluzione geometrica di 10 metri attuali a 3-1 metri; nel multispettrale, dai 20 metri attuali a 4 metri. L'accuratezza geometrica migliorerà notevolmente (tabella 1.9). I passaggi si evolveranno nel senso di una maggior frequenza di ripresa di una determinata area: da 44-16 giorni attuali, a 5-1 giorni.

Le immagini SPIN-2, già disponibili, anticipano le possibili applicazioni con i

Tabella 2. Caratteristiche operazionali dei sistemi satellite-sensori NOAA, Rwersours-01, Landsat, SPOT, JERS-1, IRS.

CARATTERISTICHE	NOAA-11	Resurs-01	Landsat 4,5	Landsat 1,2,3	SPOT	JERS-1	IRS-1C	IRS-P3
Risoluz. Temporale (g)	0,5	4	16	18	1-26	44	24	
Altezza equatore (km)	833/873	678	705	920	832	570	6	7
Risoluzione radiometrica	10 bit	6	8 bit	7e6 bit	6 bit	8 bit	6	6
Area ripresa (km <sup>2</sup> )	2.700x2.700	600x600	185x185	185x185	60x60	60x60	75x75	70x70
MegaByte per banda	9	122	40	5,3	36	9	13	196
<b>SENSORE</b>	<b>AVHRR</b>	<b>MSU-SK</b>	<b>TM</b>	<b>MSS(L1-5)</b>	<b>PAN</b>	<b>HRV</b>	<b>VNIR</b>	<b>PAN</b>
Risoluzione spettrale								
Pancromatico					0,51-0,73			0,50-0,75
Blu			0,45-0,52					
Verde		0,50-0,60	0,52-0,60	0,50-0,60	0,50-0,59	0,52-0,60		0,52-0,59
Rosso	0,58-0,68	0,60-0,70	0,63-0,69	0,60-0,70	0,61-0,68	0,63-0,69		0,62-0,68
Vicino IR		0,70-0,80		0,70-0,80		0,76-0,86		0,77-0,86
Vicino IR	0,72-1,10	0,80-1,10	0,76-0,90	0,80-1,10	0,79-0,89	0,76-0,86**		
Medio IR			1,55-1,75					1,55-1,70#
Medio IR	3,55-3,93							1,55-1,75
IR Termico	10,3-11,3	10,4-12,5*	10,4-12,5*					
IR Termico	11,5-12,5							
Medio IR			2,08-2,35					
Risoluz. geometrica	1.100	170 600*	30 120*	80	10	18x24	5,8	23 69#
Pixel / linea	3.000	3.500 1.000*	6.200	2.300	6.000	3.000	4.200	12.068
Pixel per km <sup>2</sup>	0,82	34,6 2,8	1.111	156	10.000	2.500	2.314	29.726
								6.100 2.050# 4.300
								1.890-210# 28,3

Le orbite sono tutte eliosincrone e vivino polare

\* Risoluzione geometrica nell'infrarosso Termico

# Riferimento alla banda

\*\* La banda del Vicino IR è ripetuta con visione obliqua di 15,3° in avanti sulla stessa traccia di ripresa per visione stereo unita alla precedente.

Tabella 3. Caratteristiche di satelliti operativi con sistemi radar

Satellite	ERS-1 e (2)	JERS-1	RADARSAT
Sensore	SAR	SAR	SAR
Nazionalità	CE (ESA)	Giappone	Canada
Operatività dal	1991 (95)	1992	1995
Bande	C (5,6 cm)	L (23 cm)	C (5,6 cm)
Polarizzazione	VV	HH	HH
Angolo incidenza (°)	23	35	20 - 49
Altezza orbitale (km)	777	568	793-821
Ripassaggio (g)	35	44	24
Risoluzione suolo (m)	30	18	10-100
Larghezza scena (km)	100	75	45-500

satelliti commerciali con risoluzione anche inferiore al metro e con accuratezza geometrica al suolo di 2 m.

Il Telerilevamento nelle bande ottiche si interessa proprio allo studio e alle misure delle caratteristiche di riflessione al fine di identificare superfici di iso-comportamento, che dovrebbero corrispondere a oggetti al suolo di natura simile. Ad esempio la clorofilla assorbe fortemente l'energia radiante negli intervalli di lunghezza d'onda intorno a 0,45  $\mu\text{m}$  (blu) e 0,65  $\mu\text{m}$  (rosso); riflette invece la radiazione verde, in prossimità della lunghezza d'onda di 0,55  $\mu\text{m}$ , che noi percepiamo visivamente come colore delle foglie e in modo ancora maggiore nella regione dell'infrarosso vicino da 0,8 a 1,3  $\mu\text{m}$  di lunghezza d'onda, non visibile dall'occhio umano ma registrabile dai sensori.

## Risoluzioni degli strumenti

Ogni strumento è caratterizzato da diverse risoluzioni che sono in relazione alle diverse modalità di osservazione degli oggetti.

La *risoluzione geometrica* è in relazione alle dimensioni dell'area elementare al suolo di cui si rileva l'energia elettromagnetica; una immagine telerilevata è costituita da elementi base denominati pixel (*picture element*). Ogni pixel è caratterizzato da due coordinate, che individuano la sua posizione nell'immagine, e

da un Numero Digitale DN. La dimensione al suolo del pixel dipende dall'altezza di ripresa e dalle caratteristiche del sensore e può variare da meno di un metro fino a più chilometri.

Per *risoluzione spettrale* si intende l'intervallo di lunghezze d'onda a cui è sensibile lo strumento.

La *risoluzione radiometrica* è la minima energia in grado di stimolare l'elemento sensibile affinché produca un segnale elettrico rilevabile dall'apparecchiatura, oltre il rumore intrinseco, connessa alla capacità che ha il sensore di rilevare l'intensità del segnale elettromagnetico proveniente dagli oggetti investigati. È definita da 1/256 nel caso di 8 bit, 1/128 per 7 bit, 1/64 per 6 bit, ecc.; esiste cioè un intervallo minimo di radianza che sta in un Numero Digitale DN.

Per *risoluzione temporale* si intende invece il periodo di tempo che intercorre tra due riprese successive di una stessa area. (Lechi, 1995).

## Il sistema Radar

Le applicazioni del Telerilevamento in banda radar sono in promettente evoluzione e in alcune situazioni già offrono interessanti risultati. Il radar viene utilizzato per indagini di geologia strutturale, idrogeologia, per ricerche sulla superficie del mare e per studi di morfologia carsica, vulcanica, alluvionale e glaciale, per applicazioni in agricoltura e foreste, per

il monitoraggio di eventi catastrofici.

Il radar ha diversi pregi:

- è un sensore attivo capace di attraversare i livelli dell'atmosfera costantemente perturbati e di rilevare la superficie terrestre anche in presenza di copertura nuvolosa.
- descrive generalmente la forma e la struttura tridimensionale degli oggetti, e dà indicazioni sul contenuto di umidità dei suoli e della vegetazione, mentre i sistemi ottici rispondono al colore ed alla temperatura degli oggetti.
- le onde radar, più lunghe (bande L e C) possono 'attraversare' la copertura vegetale e dare informazioni sul contenuto di umidità del suolo al di sotto di essa.
- il sistema radar illumina obliquamente una certa fascia di territorio esaltando molto gli aspetti morfologici come rugosità e pendenza delle superfici.

L'interferometria SAR, che in tempi recenti ha portato tante interessanti applicazioni, fa uso di due antenne separate da una distanza fissa. Questa situazione si realizza mediante acquisizioni di dati sulla stessa area durante due orbite vicine. I valori di fase per ogni pixel corrispondente alla stessa area a terra nelle due riprese vengono sottratti l'uno dall'altro ottenendo un *interferogramma*. Questa immagine contiene solo l'informazione sulle differenze di fase legate alle diverse distanze dei pixel dall'antenna SAR e quindi alle variazioni di altezza dei pixel. E' così possibile ricostruire pixel a pixel il modello numerico del terreno (DEM - *Digital Elevation Model*) con un'accuratezza dell'ordine di alcuni metri. La ravvicinata acquisizione di immagini dall'ERS-1 e ERS-2 con uno sfasamento tra i due di un giorno (tandem mission), avvenuta per qualche mese tra il 1995 ed il 1996, ha consentito interessanti sviluppi nella conoscenza dell'interferometria e delle sue possibili applicazioni.

## Stazioni di ripresa

Il Telerilevamento da satellite offre agli operatori impegnati nei problemi dell'ambiente, della gestione delle risorse terrestri e della pianificazione territoriale ed ambientale opportunità sia per l'identificazione di oggetti che per la conoscenza di processi dinamici di superficie utili alla predizione di vulnerabilità e rischi.

Tra le missioni operative a breve, che aprono il capitolo dell'alta risoluzione, vi sono i satelliti *EarlyBird*, *QuickBird*, *OrbView-1* e *Space Imaging*, con le seguenti caratteristiche fondamentali:

- operatività immediata senza fasi sperimentali;

Tabella 4. Accuratezza geometrica di immagini pancromatiche orto-rettificate di satelliti commerciali ad altissima risoluzione confrontate con il volo Italia aerofotogrammetrico 1:70.000 ca.

Satellite	Risoluzione Spaziale (m)	Accuratezza geometrica (m)	Dimensione scena (km x km)	Stereoscopia
SPIN-2 TK-350	10	-	200 x 300	si
SPIN-2 KVR-1000	2	20	40 x 160	no
Early Bird	3	6	6 x 6	si
Quick Bird	0,82	2	36 x 36	si
Orb-View 1	1	2	8 x 8	si
Space Imaging	1	2	60 x 60	si
Volo Italia	< 1	5-10	15 x 15	si

- flessibilità nella programmazione delle riprese e nel puntamento definiti dall'utente;
- altissima risoluzione e accuratezza geometrica;
- acquisizione regionale di scene con dimensioni contenute per via dell'alta risoluzione geometrica;
- ottima registrazione di immagini acquisite in tempi diversi;
- possibilità di visione stereoscopica con ripresa nadirale e obliqua sulla stessa traccia (con un ritardo di ripresa tra le due immagini di pochi secondi);
- tempi di acquisizione e di consegna delle immagini pre-elaborate rapidissimi.

## Sistemi da aereo

Al fine di offrire alla comunità scientifica un'attività di supporto alla ricerca ambientale il CNR, nell'ambito del Progetto Strategico "Clima, ambiente e territorio nel Mezzogiorno", ha istituito il progetto LARA (Laboratorio Aereo per Ricerche Ambientali) per l'acquisizione di dati telerilevati da piattaforma aerea. Il Progetto possiede e gestisce il sistema a scansione MIVIS (Deadalus AA5000), capostipite di una nuova generazione di apparati sensoriali iperspettrali, che opera con un'elevata risoluzione spaziale e spettrale su aereo CASA C212. La stazione di terra del Progetto, situata a Pomezia, gestisce con il sistema software MIDAS (*Multispectral Interactive Data Analysis System*) il processamento, l'archiviazione e la distribuzione del dato MIVIS (Marino, 1993).

Le caratteristiche dello strumento iperspettrale MIVIS sono:

- 102 bande spettrali;
- copertura spettrale compresa tra 0,43 e 12,7  $\mu\text{m}$ ;
- scena ripresa per linea di scansione pari a 755 pixel;
- digitalizzazione dei dati in 12 bit per pixel;

La risoluzione spaziale del sensore è di 2 mrad; in funzione dell'altezza della piattaforma: a 12.000 m la risoluzione del pixel al suolo è pari a 24 m x 24 m, la risoluzione aumenta progressivamente al diminuire della quota di ripresa, fino ad essere pari a 2 m x 2 m per un'altezza di 1.000 m.

## Elaborazione digitale dei dati telerilevati

Il termine elaborazione digitale delle immagini o *digital image processing* si riferisce a tutte le operazioni eseguite su un'immagine per trasformarla in modo

da rendere più agevole l'estrazione di informazioni riguardanti gli oggetti in essa rappresentati.

Data la grande mole di dati che i sensori di Telerilevamento acquisiscono, la messa a punto di procedure automatiche di interpretazione risulta necessaria per contenere i tempi di elaborazione ed ottenere informazioni tempestive e complete sui fenomeni osservati.

Una immagine digitale o numerica è una distribuzione a due dimensioni definita mediante un campionamento secondo un modello regolare a griglia (pixel) e i valori che può assumere appartengono a un intervallo definito di numeri interi positivi.

Ogni pixel è caratterizzato da valori ( $DN_1, DN_2, DN_n-1, DN_n$ ) tanti quante sono le bande spettrali, oltre alle sue coordinate-immagine. DN è una grandezza di tipo discreto; per esempio se per misurare questa informazione si usasse un solo bit, si potrebbero rappresentare solo due livelli di radianza 0 e 1, mentre con 8 bit si possono rappresentare 256 differenti livelli di intensità, da 0 a 255 (figura 1).

## Tecniche di classificazione

Raccolti e pre-elaborati, con correzioni radiometriche e geometriche, i dati da satellite, si pone il problema di estrarre le informazioni che essi contengono. Un primo approccio è costituito dall'esame visivo di combinazioni multispettrali in veri e falsi colori. Ciascuna di esse, infatti, fornisce indizi più o meno numerosi sulle realtà al suolo deducibili dall'esame delle configurazioni che vi appaiono. Questo tipo di esame interpretativo visuale è particolarmente adatto per fini geologici o

idrologici e per un'analisi delle classi di copertura/uso del suolo.

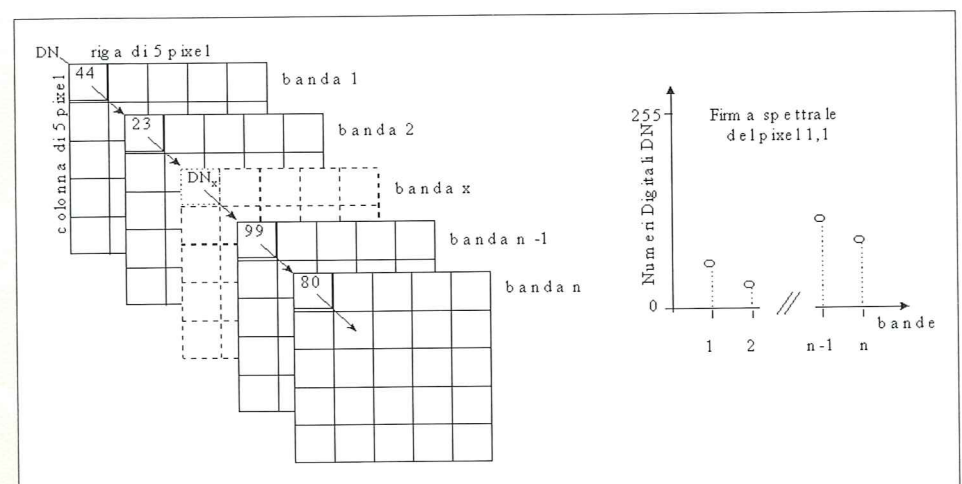
Per ben utilizzare le informazioni contenute in ciascuna delle bande di frequenza usate e per trattare in tempi brevi le grandi quantità di dati prodotte dai diversi sistemi di ripresa, si ricorre preferibilmente a procedure di riconoscimento delle configurazioni spettrali con algoritmi appositamente sviluppati.

Gli algoritmi più utilizzati fino ad oggi definiscono in modo rigido la classe di appartenenza del pixel nell'immagine ignorando il fatto che la maggior parte dei pixel in un'immagine telerilevata rappresentano un valore medio di radianza proveniente da due o più categorie di superfici (pixel misti): in questo senso si parla di classificazione rigida o di *hard classification*. Tra questi si individuano due categorie: senza controlli (non-guidata o *unsupervised*) e con controlli al suolo, (guidata o *supervised*, tra cui il più usato è l'algoritmo di massima verosimiglianza o MLL), a seconda che il metodo preveda o meno una fase preliminare in cui è richiesto l'intervento umano di indirizzo.

In questo ultimo decennio è stata messa in dubbio l'efficacia dei classificatori rigidi: per questa ragione si stanno sviluppando diverse procedure e relativi algoritmi, che hanno la capacità di non mescolare le informazioni provenienti dal singolo pixel, ma di mantenerle nelle proporzioni dei singoli componenti; in questo caso si parla di classificazione sfumata, non rigida o *soft classification*.

Tra questi, la Teoria dei *Fuzzy Sets* costituisce un valido strumento matematico per il trattamento dell'incertezza dell'informazione presente nei dati telerilevati.

Figura 1. Modello a griglia (pixel) delle immagini multispettrali e comportamento spettrale del pixel 1,1.



ti. Contrariamente agli approcci tradizionali di classificazione (classico il MLL), per i quali vale la legge *un pixel-una classe*, al pixel  $x$  dell'immagine è associabile un valore reale  $fC(x)$ , compreso tra 0 e 1, che rappresenta il *grado di appartenenza parziale* del pixel alla generica classe  $C$ . Tanto più  $fC(x)$  è uguale a 1, tanto più il pixel appartiene a  $C$ .

L'interesse nelle *reti neurali* per la classificazione delle immagini multi-sensore è recente; tipicamente sono costituite da insiemi di unità elementari (neuroni) totalmente o parzialmente interconnesse. I vantaggi nell'uso di questo metodo si riassumono nell'indipendenza dal bisogno di conoscenza a priori sulla distribuzione statistica dei dati, in tempi di classificazione veloci e robustezza agli errori.

Promettente anche il rilevamento del cambiamento dell'uso/copertura del suolo, mediante l'analisi automatica di immagini telerilevate acquisite su di una stessa area in tempi diversi (*Change Detection*). Le possibili applicazioni includono il rilevamento di cambiamenti della copertura del suolo, lo spostamento delle coltivazioni, la deforestazione, il monitoraggio di diverse forme di inquinamento territoriale, la quantificazione delle aree distrutte dal fuoco, lo sviluppo urbano, ecc. La rilevazione dei cambiamenti può essere effettuata sia confrontando direttamente le risposte spettrali contenute nelle immagini multitemporali, sia confrontando tra loro le mappe di classificazione ottenute alle singole date. Nel primo caso si possono evidenziare i cambiamenti, nel secondo si possono identificare le transizioni tra differenti tipi di coperture vegetali o di uso del territorio.

## Classificazione di immagini radar

La classificazione delle colture attraverso elaborazione automatica delle immagini radar è complicata dai segnali di rumore (*speckle*), tipiche di queste immagini. La presenza del rumore rende difficile l'applicazione delle tecniche basate sulla classificazione dei singoli pixel (*pixel-based*).

L'approccio basato sull'unità campo (*field based*) prevede l'utilizzo dei loro limiti digitalizzati per estrarre il valore medio del segnale per ciascun campo (*Mean Field Backscatter*) o il valore statisticamente più rappresentato (*Majority Field Backscatter*) per superare il problema del rumore nelle immagini radar (*speckle*). I

campi sono definiti da unità che non considerano la loro variabilità interna.

I dati multitemporali di *Synthetic Aperture Radar* (SAR) e quelli nel visibile e nel vicino infrarosso del *Thematic Mapper* (TM), così come altre fonti di dati ottici telerilevati, possono essere efficacemente integrati per la classificazione delle colture.

L'integrazione dei dati SAR e TM consente:

- miglior accuratezza della classificazione per una singola data di indagine;
- sostituzione dei pixel coperti da nuvole nel TM con pixel ottenuti da SAR;
- migliorata classificazione delle colture con l'utilizzo di immagini multitemporali.

## Analisi multispettrale e multitemporale

L'analisi multispettrale consente di indagare un certo elemento in diversi intervalli di lunghezze d'onda caratterizzando rispetto ad un altro e disegnandone la firma spettrale. La separabilità degli elementi dipende dalla de-correlazione delle bande spettrali utilizzate, oltre che dalle 4 risoluzioni geometrica, spettrale, radiometrica e temporale.

L'elemento territoriale da rilevare può avere un comportamento spettrale diverso in funzione del momento in cui è osservato. Pertanto oltre all'uso di immagini multispettrali è importante l'acquisizione multitemporale cioè in momenti diversi, per es. del ciclo fenologico per ciascuna coltura da indagare.

La copertura nuvolosa è un ostacolo che impedisce ai sensori ottici di rilevare la risposta spettrale degli elementi che costituiscono o ricoprono la superficie terrestre, riducendo di fatto le possibilità di scelta ed uso delle immagini. Più lungo è il ciclo di un satellite minori sono le probabilità di avere immagini senza nuvole di una stessa scena. La possibilità di visione laterale programmabile che hanno alcuni strumenti di ripresa da satellite contribuisce a risolvere in parte questo problema.

I sistemi attivi, cioè gli strumenti che operano in banda di frequenza radar (SAR), sono stati progettati per superare questa limitazione non essendo il segnale emesso, nel dominio spettrale delle microonde, modificato dalle condizioni atmosferiche. Come detto, l'integrazione tra sistemi diversi sia attivi che passivi può quindi contribuire ad una migliore copertura temporale delle aree di studio.

## Comportamento spettrale della vegetazione

La vegetazione manifesta comportamenti spettrali specifici a diverse lunghezze d'onda producendo una firma caratteristica. La curva di riflettanza può variare il suo andamento in funzione di molti fattori quali il tipo di vegetazione e la sua densità, lo stadio fenologico, lo stato fito-sanitario, il contenuto di umidità, ecc. In particolare il suo andamento è regolato nelle bande del visibile, vicino e medio infrarosso rispettivamente dal contenuto e tipo di pigmenti fogliari, dalla struttura fogliare ed il contenuto in acqua (figura 2).

- *Pigmenti fogliari*: La porzione di energia riflessa nel campo del visibile è correlata alla presenza di pigmenti fogliari quali la clorofilla, la xantofilla e il carotene.
- *Struttura fogliare*: è responsabile del comportamento spettrale nelle bande dell'infrarosso vicino, tra 0,70 e 1,35  $\mu\text{m}$  provocando una riflessione molto elevata, nell'ordine del 30-70%, dell'energia incidente.
- *Contenuto in acqua*: nel dominio dell'infrarosso medio, tra 1,35 e 2,70  $\mu\text{m}$ , le proprietà spettrali della vegetazione dipendono strettamente dal contenuto in acqua della foglia.

## Risposta spettrale dei suoli

La riflettanza dei suoli dipende dalla loro composizione fisica (es. contenuto di umidità, tessitura e struttura) e chimica (es. contenuto di sostanza organica) che ne determina il colore superficiale, utile indicatore del tipo di suolo e delle sue proprietà.

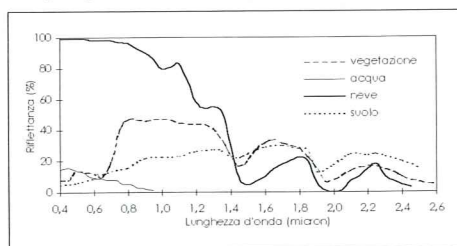
## Risposta spettrale dell'acqua

Questa varia, come per suoli e vegetazione, con la lunghezza d'onda, compatibilmente con l'interazione energia-materia che dipende dalla natura stessa dell'acqua e dalle varie condizioni in cui si trova.

La semplice identificazione dell'acqua può essere fatta con una certa facilità nel vicino infrarosso (0,7-1,2  $\mu\text{m}$ ), perché assorbe tutta l'energia incidente, mentre lo studio e l'accertamento delle condizioni

in cui l'acqua si trova si effettua nelle bande nel visibile (0,4-0,7  $\mu\text{m}$ ). Lo studio della copertura nevosa si esegue con le bande del medio infrarosso (1,3-3,0  $\mu\text{m}$ ) dove la riflettanza è molto bassa e può essere discriminata dalla copertura nuvolosa che ha in questo intervallo un valore molto elevato.

**Figura 2.** Firme spettrali di alcuni elementi che compongono una scena.



## Vegetazione, suolo e acqua nelle immagini radar

Ben diverso è il comportamento dei diversi elementi che compongono una scena sul territorio in banda radar. Le variazioni possono essere spiegate in termini di differenze di geometria della superficie, rugosità e contenuto d'acqua degli elementi presenti in una scena (Gomarasca, 1997).

## Considerazioni conclusive

Il Telerilevamento ha quindi ampie possibilità di applicazione. La ragione principale per lo stentato decollo nell'uso dei dati telerilevati deriva dal fatto che la spesa per lo sviluppo della tecnologia spaziale è stata per anni concentrata sui sensori e sulla progettazione delle piattaforme satellitari, sugli sforzi di costruzione e di lancio, senza cercare di partire dalle esigenze della comunità scientifica e dell'utente finale. Le attese ottimistiche riguardo alle potenzialità dei singoli sensori non sono bastate a colmare questa divergenza. Programmi come il CEO (*Centre for Earth Observation*), promosso e sostenuto dalla Commissione Europea (<http://www.ceo.org>) stanno operando per dare delle soluzioni operative a questo problema.

Il limitato uso di dati ha di fatto impedito una riduzione dei costi di acquisizione e di processamento. L'evoluzione tecnologica ed il passaggio alla fase di realizzazione e lancio di satelliti commerciali progettati da gruppi privati, ha già ridotto di molto il costo degli stessi. I sistemi di acquisizione, trattamento e distri-

buzione delle immagini tendono ad avvicinarsi alle esigenze e all'inesperienza dell'utente realizzando prodotti pronti per l'uso.

Fondamentale risulterà pertanto la comunicazione con e tra gli utenti, la realizzazione di prodotti a più alto livello, sia di elaborazione che di qualità, standardizzazione dei dati, decentralizzazione degli archivi dei dati.

In tutto il mondo il numero degli archivi multipli di banche dati geografiche digitali è in continuo aumento. Distrarci tra gli archivi e capire quale possiede i dati di interesse e come si possa accedervi è un esercizio che spesso anche gli addetti ai lavori svolgono con difficoltà. In quest'ottica sono stati sviluppati sistemi per un innovativo riordino delle banche dati e una standardizzazione dei formati, fondamentali come la certificazione di qualità, per esempio sulla calibrazione radiometrica e sulla stima dell'accuratezza della classificazione, sia per i dati originali che per quelli elaborati.

Con l'utilizzo delle reti di computer la localizzazione e l'accesso alle banche dati è divenuta più veloce. I servizi in linea, come *World Wide Web* (WWW), stanno crescendo in modo esplosivo al punto che le reti e la velocità del trasferimento dei dati dovranno essere potenziate perché la crescente domanda di accesso degli utenti sta saturando velocemente questa via preferenziale di accesso alle informazioni territoriali, ed il trasferimento di dati di Osservazione della Terra, in continua espansione, contribuirà in modo significativo a tale saturazione.

Un contributo alla diffusione delle conoscenze sull'uso e sulle tecniche di Telerilevamento viene dall'Associazione Italiana di Telerilevamento (AIT) che ha predisposto un CD-ROM dal titolo:

*Tecnologie per lo studio del territorio: strumenti operativi per le Amministrazioni Locali*, che sarà distribuito anche allegato al prossimo numero di questa rivista.

Lo scopo è quello di portare a conoscenza degli operatori delle amministrazioni pubbliche, nazionali, regionali e locali, delle potenzialità del Telerilevamento nello studio, gestione e programmazione del territorio e dell'ambiente fornendo un'ampia casistica sulle possibili applicazioni, con descrizione, a vari livelli di approfondimento, degli strumenti e delle tecniche disponibili.

Mario Gomarasca



Mario A. Gomarasca svolge attività di ricerca applicata in agricoltura e sull'ambiente utilizzando tecniche di Telerilevamento e GIS. Laureato in Scienze Agrarie all'Università Statale di Milano, ha seguito corsi di specializzazione

presso l'International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC) di Enschede, Olanda ed è stato ospite per un anno, come Visiting Scientist, presso il Laboratory for Applications of Remote Sensing (LARS), Purdue University, West Lafayette, IN, USA. Attualmente vice-presidente e segretario scientifico dell'Associazione Italiana di Telerilevamento, è impegnato nella promozione e diffusione delle tecniche per la gestione delle risorse agricole ed ambientali con particolare riguardo all'aspetto formativo.

## BIBLIOGRAFIA

- BRIVIO P.A., LECHI G., ZILIOLI E., (1992), *Il Telerilevamento da Aereo e da Satellite*, C. Delfino Editore, Sassari, 250 pp.
- Brivio P.A., Zani G., (1995), *Glossario Trilingue di Telerilevamento*, Ed. AIT, Firenze, 195 pp.
- Brivio P.A., Zilioli E., (1995), *Telerilevamento Aereo e da Satellite per lo studio del Rischio Ambientale*, Edizioni dell'Ulisse, Roma, 167 pp.
- Bruzzi S., (1995), *Special Feature: ENVISAT, EARSeL Newsletter*, 4: 4-13.
- Lechi G., (1996), *Dispense del Corso di Telerilevamento, DIAR, Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Milano*, 290 pp.
- Gomarasca, M.A., (1997), *Introduzione a Telerilevamento e GIS per la Gestione delle Risorse agricole e Ambientali*, Ed. AIT, 250 pp, 32 Tavole a colori.
- Marino C.M., (1993), *Progetto LARA, Laboratorio Aereo per Ricerche Ambientali*, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Pomezia, Roma.
- Richards J.A., (1986), *Remote Sensing Digital Image Analysis: an Introduction*, Springer-Verlag, Berlin.
- Swain P.H., Davis S.M., (1978), *Remote Sensing: The Quantitative Approach*, Mc Graw-Hill Book Company, Parigi-New York.

**Figura 3.** Un esempio di uso del suolo di Trino Vercellese.

