

Niccolò Dainelli  
L'OSSERVAZIONE DELLA TERRA – TELERILEVAMENTO  
Manuale teorico-pratico per l'elaborazione delle immagini digitali

ISBN 978-88-579-0083-4

© 2011 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686  
www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: maggio 2011

Il volume è completato da: L'osservazione della Terra – Fotointerpretazione

Dainelli, Niccolò <1969->

L'osservazione della terra : telerilevamento: manuale teorico-pratico per l'elaborazione delle immagini digitali / Niccolò Dainelli. - Palermo : D. Flaccovio, 2011.

ISBN 978-88-579-0083-4

1. Telerilevamento.  
621.3678 CDD-22

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, maggio 2011

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto dall'editore.

## INDICE

### Premessa

### Parte Prima Telerilevamento teorico

#### 1. I fondamenti fisici del telerilevamento

1.1. Cenni introduttivi.....	»	3
1.2. La natura della radiazione elettromagnetica.....	»	4
1.3. Lo spettro elettromagnetico.....	»	7
1.4. Le grandezze radiometriche.....	»	7
1.5. L'emissione di energia da parte della materia.....	»	8
1.6. L'interazione della radiazione con l'atmosfera.....	»	11
1.7. L'interazione della radiazione con la superficie terrestre.....	»	14
1.8. Le firme spettrali.....	»	16

#### 2. Sistemi di ripresa

2.1. Cenni introduttivi.....	»	19
2.2. Sensori attivi e passivi.....	»	19
2.3. I tipi di piattaforma per il telerilevamento.....	»	21
2.3.1. Piattaforme satellitari.....	»	21
2.3.2. Piattaforme aeree.....	»	23
2.3.3. Piattaforme al suolo.....	»	24
2.4. I sensori per il telerilevamento.....	»	25
2.4.1. Sensori ottici passivi non fotografici.....	»	26
2.5. La risoluzione degli strumenti.....	»	28
2.5.1. Risoluzione geometrica.....	»	29
2.5.2. Risoluzione spettrale.....	»	30
2.5.3. Risoluzione radiometrica.....	»	31
2.5.4. Risoluzione temporale.....	»	32
2.6. Panoramica dei principali satelliti e sensori per il telerilevamento.....	»	32
2.6.1. Cenni introduttivi.....	»	32
2.6.2. Le bande spettrali.....	»	33
2.6.3. I sensori.....	»	34
2.6.3.1. La famiglia dei satelliti Landsat.....	»	35
2.6.3.2. I satelliti francesi Spot.....	»	36
2.6.3.3. I satelliti indiani.....	»	38
2.6.3.4. Il sensore ASTER.....	»	41
2.6.3.5. I sensori commerciali ad altissima risoluzione.....	»	42

2.6.3.6. I satelliti israeliani della serie EROS.....	»	46
2.6.3.7. I sensori aerotrasportati multispettrali e iperspettrali .....	»	47
2.6.3.8. I sensori prossimamente in orbita.....	»	49

### 3. L'elaborazione e la trasformazione delle immagini da telerilevamento

3.1. Le caratteristiche delle immagini telerilevate .....	»	51
3.1.1. Il concetto di immagine digitale .....	»	51
3.1.2. L'istogramma e lo scatterogramma .....	»	53
3.1.3. Brevi cenni sulla teoria dei colori .....	»	57
3.1.4. Le composizioni a veri e falsi colori .....	»	59
3.2. Pre-elaborazioni: correzioni geometriche e radiometriche .....	»	61
3.2.1. Cenni introduttivi.....	»	61
3.2.2. Gli errori radiometrici e la loro correzione .....	»	61
3.2.3. Le distorsioni geometriche e la loro correzione .....	»	63
3.2.3.1. Definizione del sistema geodetico-cartografico .....	»	65
3.2.3.2. I GCP .....	»	66
3.2.3.3. La funzione di trasformazione.....	»	68
3.2.3.4. Valutazione della trasformazione: l'errore quadratico medio .....	»	69
3.2.3.5. Il ricampionamento.....	»	71
3.3. Il miglioramento delle immagini.....	»	72
3.3.1. Gli scopi del miglioramento .....	»	72
3.3.2. Il miglioramento mediante operatori puntuali .....	»	72
3.3.2.1. <i>Grey level thresholding</i> (soglia di toni di grigio) .....	»	72
3.3.2.2. <i>Level slicing</i> .....	»	73
3.3.2.3. <i>Contrast stretching</i> .....	»	73
3.3.3. Il miglioramento mediante operatori locali .....	»	77
3.4. La trasformazione delle immagini.....	»	81
3.4.1. Cenni introduttivi .....	»	81
3.4.2. Le operazioni fra bande spettrali .....	»	81
3.4.2.1. Somma .....	»	82
3.4.2.2. Differenza .....	»	82
3.4.2.3. Moltiplicazione .....	»	82
3.4.2.4. Divisione .....	»	83
3.4.3. Gli indici di vegetazione.....	»	83
3.4.4. L'analisi delle componenti principali .....	»	86
3.4.5. La fusione dati ( <i>pan-sharpening</i> ) .....	»	91

### 4. La classificazione delle immagini multispettrali

4.1. Cenni introduttivi.....	»	93
4.2. La classificazione supervisionata.....	»	94
4.2.1. La fase di <i>training</i> .....	»	94

4.2.2. I tipi di classificatore più usati.....	»	95
4.2.3. Verifica dell'accuratezza.....	»	99
4.3. La classificazione non supervisionata.....	»	100

## Parte Seconda Telerilevamento applicato

### 5. Introduzione alle esercitazioni

5.1. Cenni introduttivi.....	»	103
5.2. Le immagini disponibili .....	»	103
5.3. Il percorso logico delle esercitazioni .....	»	105

### 6. Introduzione al software ILWIS

6.1. Cenni introduttivi.....	»	107
6.2. Introduzione a ILWIS 3.x .....	»	108
6.2.1. Installare ILWIS .....	»	109
6.2.2. Lanciare ILWIS .....	»	109
6.2.3. Il NAVIGATOR .....	»	110
6.2.4. Il CATALOG .....	»	111
6.2.5. Gli oggetti di ILWIS .....	»	111
6.2.5.1. <i>1 data objects</i> .....	»	112
6.2.5.2. <i>1 service objects</i> .....	»	113
6.2.5.3. <i>Gli special objects</i> .....	»	114
6.2.5.4. <i>1 container objects</i> .....	»	115
6.2.6. Le barre del titolo e del menu.....	»	115
6.2.7. L'OPERATION-TREE e l'OPERATION-LIST.....	»	116
6.2.8. La STATUS BAR.....	»	116
6.2.9. Le toolbar della MAIN WINDOW .....	»	117
6.2.10. L'HELP in linea e la documentazione.....	»	118

### 7. Esercitazione: importazione e visualizzazione delle immagini telerilevate in ILWIS

7.1. Cenni introduttivi e DATASET .....	»	121
7.2. La procedura di importazione .....	»	123
7.2.1. Esercizi .....	»	128
7.3. Visualizzazione di dati telerilevati e loro proprietà.....	»	129
7.3.1. Esercizi .....	»	143
7.4. L'istogramma .....	»	143
7.4.1. Esercizi .....	»	146

### 8. Esercitazioni di pre-elaborazione di immagini telerilevate

8.1. Cenni introduttivi e scopi .....	»	149
---------------------------------------	---	-----

8.2.	La trasformazione da valori di <i>digital number</i> a valori di radianza.....	» 150
8.3.	Applicazione di un semplice algoritmo di correzione atmosferica .....	» 157
8.4.	La conversione da valori di radianza a valori di temperatura di brillantezza ...	» 164
8.4.1.	Esercizi .....	» 166
8.5.	Un esempio di correzione geometrica: la registrazione immagine-immagine .....	» 167

## 9. Esercitazioni di miglioramento di immagini telerilevate

9.1.	Cenni introduttivi e scopi .....	» 177
9.2.	Esercizi di miglioramento mediante operatori puntuali .....	» 177
9.2.1.	Applicazione di soglie di livelli di grigio con il <i>grey level thresholding</i> .....	» 177
9.2.2.	Una semplice classificazione dell'immagine: il <i>density slicing</i> .....	» 183
9.2.3.	Il miglioramento del contrasto attraverso il <i>contrast stretching</i> .....	» 187
9.2.3.1.	Lo <i>stretching lineare</i> : applicazione temporanea .....	» 187
9.2.3.2.	Lo <i>stretching lineare</i> : applicazione permanente .....	» 195
9.2.3.3.	L'equalizzazione dell'istogramma .....	» 197
9.3.	Esercizi di miglioramento mediante operatori locali .....	» 199
9.3.1.	Applicazione di filtri passa-basso ( <i>smoothing</i> ) .....	» 199
9.3.2.	Applicazione di filtro passa-alto ( <i>edge enhance</i> ) .....	» 202
9.3.3.	Esercizi .....	» 205

## 10. Esercitazioni di trasformazione delle immagini telerilevate

10.1.	Cenni introduttivi e scopi .....	» 207
10.2.	Operazioni fra bande spettrali .....	» 207
10.2.1.	Applicazione della sottrazione fra bande: il <i>change detection</i> .....	» 207
10.2.2.	Applicazione del rapporto di banda: gli indici di vegetazione .....	» 214

## 11. Esercitazioni di classificazione delle immagini telerilevate

11.1.	Cenni introduttivi e scopi .....	» 223
11.2.	Classificazione non supervisionata .....	» 223
11.2.1.	Esercizi .....	» 228
11.3.	Classificazione supervisionata .....	» 228
11.3.1.	Esempi di classi di copertura del suolo .....	» 229
11.3.2.	Preparazione alla fase di <i>training</i> .....	» 231
11.3.3.	Acquisizione delle aree di <i>training</i> .....	» 233
11.3.4.	Fase di classificazione .....	» 236
11.3.5.	Fase di post-classificazione .....	» 239
11.3.6.	Esercizi .....	» 241

Bibliografia.....	» 243
-------------------	-------

Ringraziamenti.....	» 245
---------------------	-------

## PREMESSA

Dal 1972, quando il primo satellite della famiglia Landsat è stato messo in orbita, il telerilevamento per l'osservazione della Terra ha fatto passi da gigante. Attualmente, i satelliti commerciali riescono a fornire immagini con una definizione fino a 50 cm, rendendo la superficie del nostro Pianeta ormai virtualmente priva di segreti. Altri sensori possono osservare gli oggetti in bande dello spettro elettromagnetico così piccole da riconoscere il materiale di cui sono fatti. L'orbita terrestre pullula di satelliti artificiali, molti dei quali destinati all'osservazione della Terra e sempre di più ne vengono lanciati ogni anno.

Oggi più che mai, il telerilevamento, cioè l'attività di "rilevare da lontano", è una tecnica che può dare ottimi risultati per lo studio del territorio, spesso evitando anche di visitare il sito investigato. È evidente che il controllo a terra è da considerare uno strumento di verifica auspicabile, ma non sempre e ovunque esso è realizzabile. Ai giorni nostri non solo esistono luoghi ancora difficilmente raggiungibili per mancanza d'infrastrutture viarie, ma aumentano sempre più le regioni pericolose in cui è sconsigliabile o addirittura vietato recarsi. Il telerilevamento, in queste situazioni, risulta quindi l'unica metodologia per ottenere dati e informazioni su una certa area geografica.

Per il telerilevamento sono impiegati strumenti definiti *sensori*, montati prevalentemente su piattaforme satellitari e aeree, che danno come prodotto principale *immagini digitali* rappresentanti porzioni della superficie terrestre. Questi dati costituiscono la base di partenza per l'estrazione di una gran quantità di informazioni riguardanti l'ambiente, le risorse naturali e antropiche, la copertura del suolo, la geologia e la geomorfologia, tanto per citarne una piccola parte. Tali informazioni possono essere ricavate in maniera automatica o semi-automatica attraverso algoritmi matematici o mediante l'analisi delle immagini da parte di un interprete umano e poi rappresentate tramite cartografia tematica.

Questo volume, che costituisce il primo di *L'osservazione della Terra*, è stato scritto con lo scopo di affrontare il tema del telerilevamento da un punto di vista marcatamente applicativo, fornendo comunque le necessarie basi teoriche sull'argomento, ma dedicando una buona parte del testo allo svolgimento di esercizi pratici dedicati alle principali elaborazioni necessarie per preparare le immagini all'uso, migliorarne il contrasto ed estrarne informazioni attraverso procedure



automatiche o semi-automatiche. La parte dedicata all'estrazione di informazioni mediante interpretazione invece è trattata nel secondo volume, *L'osservazione della Terra – Fotointerpretazione*.

Gli esercizi proposti nel testo fanno uso di immagini da satellite messe a disposizione per esclusivo uso didattico da società e organizzazioni di distribuzione delle stesse e sono memorizzate nel DVD allegato al libro. Per ogni elaborazione la procedura viene spiegata passaggio dopo passaggio dando al lettore la possibilità di ripeterla applicandola a un'immagine diversa.

Dato il suo approccio didattico, questo testo è stato scritto pensando allo studente universitario quale naturale destinatario ma perfettamente si adatta a qualunque figura tecnica o professionale che voglia avvicinarsi a questa disciplina con un approccio operativo.

Trattandosi di un testo di base, si è inoltre scelto volutamente di mantenere un livello appropriato, per cui alcuni argomenti non sono stati affrontati in maniera eccessivamente dettagliata, rimandandone l'approfondimento a opere specifiche segnalate in bibliografia.

## PARTE PRIMA Telerilevamento teorico

## 1. I FONDAMENTI FISICI DEL TELERILEVAMENTO

### 1.1. Cenni introduttivi

La percezione dell'ambiente circostante da parte dell'uomo e di altri animali avviene attraverso gli occhi, organi capaci di captare la luce e inviare il suo contenuto informativo al cervello, dove avviene il processo interpretativo che permette il riconoscimento degli oggetti osservati. Un sistema di questo tipo è costituito quindi da più sottosistemi: un ambiente in cui sono presenti elementi oggetto d'indagine, una fonte di luce o in generale di energia (o radiazione) elettromagnetica, la quale funge da mezzo di trasporto delle informazioni riguardo agli elementi dell'ambiente, un organo capace di sentire la luce, che può essere definito pertanto *sensore*, e un altro organo preposto all'interpretazione dei segnali inviati dal sensore. Attraverso il funzionamento di questo sistema, l'uomo può condurre osservazioni o rilevamenti su ciò che lo circonda, al fine di trarne conoscenze e informazioni utili per la propria vita.

Questi rilevamenti possono essere condotti a distanza ravvicinata o da lontano: osservazioni di dettaglio hanno bisogno che l'oggetto dell'indagine sia molto vicino, mentre la possibilità di esaminare un insieme di oggetti o un'area del nostro pianeta da lontano spesso permette di avere una visione più completa e chiara. Non per nulla, fin da tempi remoti, l'uomo ha sempre cercato di guadagnare posizioni elevate, quali ad esempio i rilievi montuosi, per condurre migliori osservazioni, sia che si trattasse di sorvegliare greggi o mandrie sia che dovesse tenere sott'occhio ampie porzioni di territorio per individuare con largo anticipo l'arrivo di nemici o degli amici. In tempi più recenti, le posizioni vantaggiose sono diventate prima i palloni aerostatici, poi i dirigibili, gli aeroplani, gli elicotteri e infine i satelliti, aumentando sempre più l'altezza da terra (quindi la distanza di osservazione) e la quantità di superficie osservabile, che è passata da qualche decina di chilometri quadrati a virtualmente l'intero pianeta Terra.

Alla luce di queste considerazioni preliminari, si può affermare che anche se il rilevamento da lontano è una tecnica antica quanto l'uomo e forse anche di più, se si considerano i suoi antenati e altri animali, ha cominciato ad assumere il ruolo di disciplina scientifica quando i mezzi e le tecniche di osservazione hanno iniziato a standardizzarsi e soprattutto quando al semplice occhio umano si sono

sostituiti, o per meglio dire affiancati, sensori artificiali capaci innanzitutto di fissare su supporti più o meno permanenti le immagini rilevate, ma anche di captare l'energia elettromagnetica al di fuori dei limiti imposti per natura all'occhio umano e quindi osservare cose che l'uomo di per sé non potrà mai vedere. Quel momento può essere considerato quale inizio del telerilevamento vero e proprio (dal greco *tele* = 'lontano' e rilevamento), ossia un insieme di tecniche e metodologie per l'acquisizione a distanza e l'interpretazione di dati relativi a oggetti e fenomeni localizzati in un intorno della superficie della Terra. Il telerilevamento inteso in questo senso prevede nella maggior parte dei casi che l'osservazione di tale superficie sia fatta guardando dall'alto verso il basso e, di solito ma non sempre, perpendicolarmente a essa.

Dai concetti espressi finora appare evidente che l'energia elettromagnetica rappresenta un elemento fondamentale affinché si possa fare del telerilevamento e che le proprietà della radiazione EM assumono una grande importanza per il riconoscimento sia di oggetti sia di fenomeni e per lo studio delle loro caratteristiche. Per questo motivo, il presente capitolo sarà dedicato alla trattazione dei fondamentali fisici su cui il telerilevamento si basa, cercando di mantenere a un livello sufficientemente elementare l'argomento e rimandando, per eventuali approfondimenti, a testi specifici.

## 1.2. La natura della radiazione elettromagnetica

Come si è accennato nel precedente paragrafo, la luce costituisce il mezzo che trasporta agli occhi dell'uomo le informazioni sull'ambiente circostante. Però è lecito chiedersi cosa sia effettivamente la luce.

In fisica, si definisce *energia* la capacità di produrre *lavoro*. Esistono differenti tipi di energia: chimica, elettrica, meccanica, ecc. Durante la produzione del lavoro, l'energia viene trasferita da un corpo a un altro e ciò può avvenire in tre diversi modi: per *conduzione*, per *convezione* e per *radiazione*. Mentre le prime due forme di trasferimento presuppongono il contatto fra i corpi o il movimento di corpi essi stessi portatori di energia, la radiazione è l'unico modo che permette la propagazione di energia attraverso il vuoto o un mezzo. La luce è propriamente una forma di propagazione di energia attraverso radiazione e più in particolare una piccola parte della più generale radiazione elettromagnetica, che comprende altre forme quali i raggi x, le microonde e le onde radio, tanto per citarne alcune comunemente conosciute. In altri termini, si può dire che la radiazione elettromagnetica rappresenta un sistema di propagazione dell'energia da un corpo a un altro attraverso lo spazio ed è particolarmente importante sottolineare che le modalità di propagazione e di interazione di tale energia con i corpi possono fornire informazioni utili per lo studio del mondo che ci circonda.

Secondo le teorie attualmente accettate e utilizzate sperimentalmente dalla fisica,

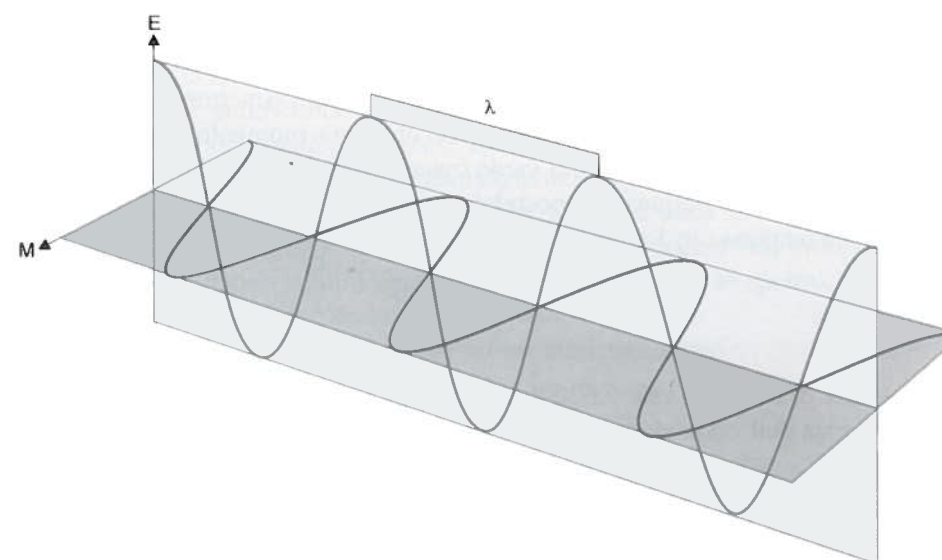


Figura 1.1. Schema dell'onda elettromagnetica con i piani di vibrazione ortogonali del campo elettrico E e di quello magnetico M

la radiazione elettromagnetica (da ora in poi radiazione EM) può essere interpretata in due diversi modi: assimilandola a un'onda o come un insieme di particelle. Secondo la cosiddetta *teoria ondulatoria*, la radiazione EM si propaga nello spazio come un'onda armonica che oscilla su due piani ortogonali fra loro e rispetto alla direzione di propagazione, rappresentanti il campo elettrico e quello magnetico generati dalla radiazione stessa (si veda figura 1.1). La distanza fra due picchi o depressioni dell'onda viene definita *lunghezza d'onda* (simboleggiata con la lettera greca  $\lambda$ ), espressa di solito in micrometri ( $1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm}$ ) o nanometri ( $1 \text{ nm} = 10^{-6} \text{ mm}$ ).

L'altra grandezza che caratterizza l'onda in questione rappresenta il numero di picchi che passano da un dato punto nell'unità di tempo (un secondo) durante la propagazione e viene definita *frequenza* (simbolo  $\nu$ ). Questa è invece espressa in cicli al secondo, ossia Hertz (Hz). Esiste una relazione che lega queste due grandezze caratteristiche ed è tale per cui il loro prodotto è costante e pari alla velocità di propagazione dell'onda stessa:

$$c = \lambda \nu \text{ m/s} \quad (1.1)$$

Il valore di tale velocità è  $299.792.458 \text{ m/s}$  ed essa è anche conosciuta come *velocità della luce*. In realtà, è la velocità di qualunque tipo di radiazione elettromagnetica. Si noti che le due grandezze, lunghezza d'onda e frequenza, sono inversamente proporzionali fra loro, il che significa che un'onda a bassa frequenza avrà lunghezza d'onda grande e viceversa.

Oltre alla teoria ondulatoria, che spiega molte delle caratteristiche della radiazio-



ne EM, un'altra teoria, definita come *quantistica*, fornisce le spiegazioni per altre proprietà. In particolare, questa teoria sostiene che la radiazione EM è trasportata da unità discrete chiamate *fotoni* o *quanti*, particelle che trasmettono da una fonte a un bersaglio proprietà tipiche dei corpi quali energia e momento, ma senza possedere una massa. L'energia quindi viene trasmessa non in maniera continua ma a *pacchetti*. Secondo l'equazione postulata da Max Planck nel 1901, l'energia  $Q$  di un fotone (espressa in Joule) è data da:

$$Q = h\nu \quad \text{Joule} \quad (1.2)$$

dove

$h$  = costante di Planck e vale  $6,62606 \cdot 10^{-34}$  Joule sec

$\nu$  = frequenza dell'onda elettromagnetica.

Se si risolve l'equazione (1.1) per  $\nu$ , la (1.2) può essere scritta:

$$Q = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.3)$$

Dalle due relazioni (1.2) e (1.3) si può dedurre che l'energia di un quanto (o fotone) è direttamente proporzionale alla frequenza dell'onda a esso associata e inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda: maggiore è la lunghezza d'onda, quindi, minore è l'energia trasportata. Questo fatto ha importanti implicazioni in telerilevamento, in quanto certe forme di radiazione EM a grande lunghezza d'onda emesse naturalmente dalla superficie terrestre sono più difficili da captare da parte dei sensori rispetto ad altre con valori di  $\lambda$  minori. Un esempio può essere quello delle microonde emesse naturalmente dalla superficie terrestre, la cui energia è di gran lunga inferiore rispetto a quella trasportata per esempio dalla radiazione infrarossa.

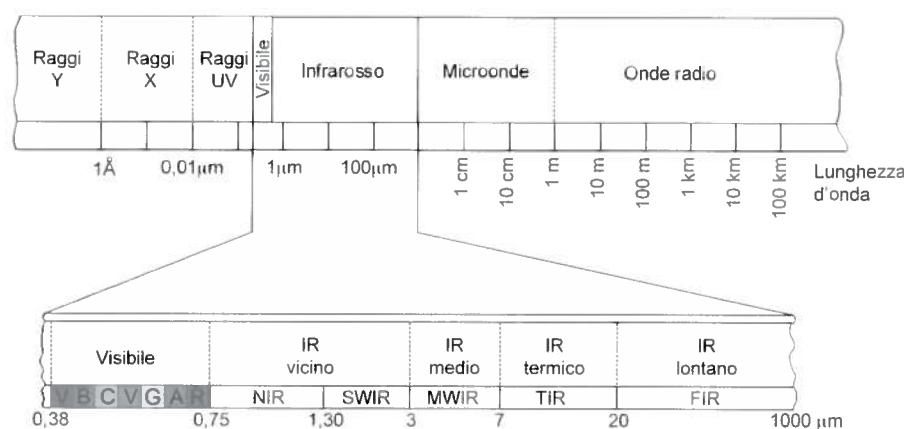


Figura 1.2. Lo spettro elettromagnetico

### 1.3. Lo spettro elettromagnetico

Si è detto che la luce è una piccola parte della radiazione elettromagnetica. Per essere più precisi, si dovrebbe puntualizzare che con il termine "luce" si intende la radiazione cosiddetta *visibile* da parte dell'uomo. Essa, assieme ad altre tipologie di radiazione, forma lo *spettro elettromagnetico* (figura 1.2) che altro non è che la rappresentazione su un asse di tutte le lunghezze d'onda suddivise in regioni, definite *bande spettrali*. Queste bande, denominate in base a vari criteri anche di origine storica, hanno confini puramente arbitrari, essendo lo spettro in realtà un *continuum* di lunghezze d'onda.

Ai fini del telerilevamento, le regioni più significative sono:

- ultravioletto (UV), da 0,01 a 0,380  $\mu\text{m}$ ;
- visibile (V), da 0,38 a 0,75  $\mu\text{m}$ ;
- infrarosso (IR), da 0,75 a 1000  $\mu\text{m}$ ;
- microonde (MW), da 0,1 a 100 cm.

Come si può osservare dalla lista, la regione del visibile – l'unica percepibile dall'occhio umano – occupa una porzione di spettro estremamente limitata pari a 0,37  $\mu\text{m}$  di estensione. All'interno di questa regione è possibile individuare in maniera approssimativa le zone spettrali in cui si trovano le lunghezze d'onda che l'occhio umano percepisce come colori, raggruppabili in tre fondamentali:

- il blu (da 0,38 a 0,5  $\mu\text{m}$ );
- il verde (da 0,5 a 0,6  $\mu\text{m}$ );
- il rosso (da 0,6 a 0,75  $\mu\text{m}$ ).

Un'altra regione particolarmente importante, che occupa una zona più ampia, è l'infrarosso. Esso è suddiviso in varie sotto-zone definite in base alla loro progressiva lontananza dal visibile: adiacente a quest'ultimo è l'infrarosso vicino (VIR), da 0,75 a 3  $\mu\text{m}$ , a cui seguono l'infrarosso medio (MIR), da 3 a 7  $\mu\text{m}$ , l'infrarosso lontano o termico (TIR), da 7 a 20  $\mu\text{m}$  e infine l'infrarosso estremo (FIR), da 20 a 1000  $\mu\text{m}$ .

### 1.4. Le grandezze radiometriche

In questo paragrafo si descriveranno le grandezze in gioco nel processo di propagazione dell'energia elettromagnetica. Una di esse è stata già citata al paragrafo 1.2 ed è l'energia  $Q$  trasmessa da un fotone (o, in altri termini, dall'onda elettromagnetica). Essa prende il nome di *energia radiante* ed è espressa in Joule. Ciò che però interessa in telerilevamento non è tanto l'energia in sé, ma la quantità di essa trasportata in un certo tempo. Per questo, si definisce il *flusso di energia radiante*:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1.4)$$

Il flusso radiante rappresenta quindi l'energia trasportata nell'unità di tempo, è espresso in Watt e quindi è in tutto e per tutto una potenza.

Di interesse è anche conoscere il flusso di energia che passa attraverso una certa area  $A$ , sia che esso stia fuoriuscendo da una fonte energetica sia che stia incidendo su un dato corpo. Nel primo caso si parla di *exitanza*, espressa in  $\text{Watt} \cdot \text{m}^{-2}$  e definita da:

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1.5)$$

Nel secondo caso viene definita invece l'*irradianza*, anch'essa espressa in  $\text{Watt} \cdot \text{m}^{-2}$ :

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1.6)$$

Una terza grandezza esprime il flusso radiante attraverso una data area e un certo angolo di osservazione. Questa è la *radianza*  $L$ , espressa in  $\text{Watt} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ , dove  $\text{sr}$  rappresenta lo steradiano, ossia un angolo solido:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\omega} \quad (1.7)$$

dove

$\theta$  = angolo di osservazione

$\omega$  = normale alla superficie osservata.

Quest'ultima grandezza radiometrica è la più importante in telerilevamento, poiché è quella effettivamente misurata dal sensore.

Le grandezze appena descritte possono variare al variare della lunghezza d'onda, il che significa che ogni tipologia di radiazione elettromagnetica sarà caratterizzata da valori tipici delle suddette grandezze.

Per questo, si definiscono, al variare della lunghezza d'onda, le seguenti:

$$\blacksquare \text{ flusso radiante spettrale } \Phi_{(\lambda)} = d\Phi/d\lambda \quad (1.8)$$

$$\blacksquare \text{ exitanza spettrale } M_{(\lambda)} = dM/d\lambda \quad (1.9)$$

$$\blacksquare \text{ irradianza spettrale } E_{(\lambda)} = dE/d\lambda \quad (1.10)$$

$$\blacksquare \text{ radianza spettrale } L_{(\lambda)} = dL/d\lambda \quad (1.11)$$

### 1.5. L'emissione di energia da parte della materia

Qualunque corpo che si trovi a temperatura superiore allo zero assoluto genera ed emette energia elettromagnetica. Questa emissione avviene in virtù dello stato di costante eccitazione in cui si trovano le particelle costituenti la materia. Ogni sorgente di energia o *radiatore* emette una serie caratteristica di onde elettromagnetiche che può essere definita in base alla loro lunghezza d'onda e intensità. Diagram-

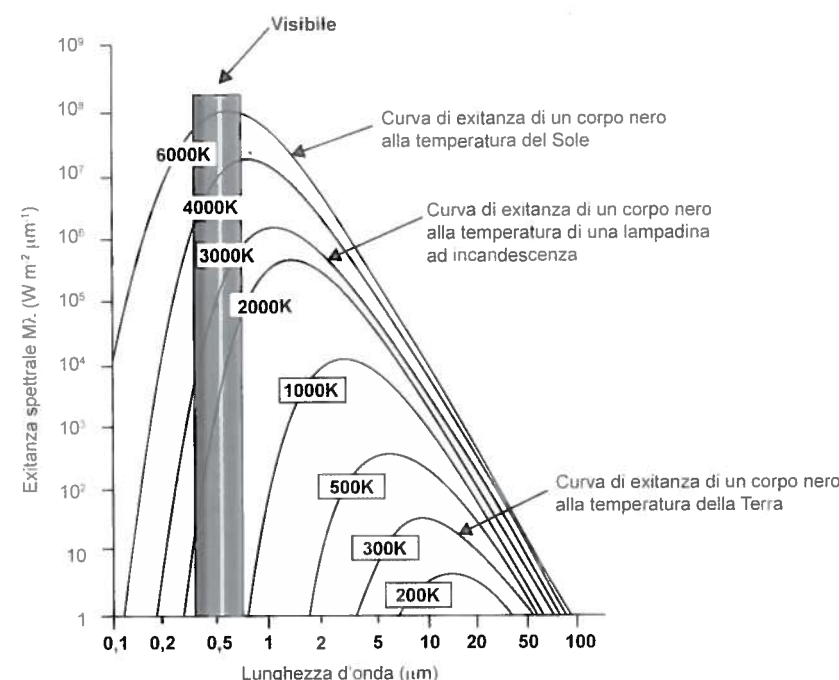


Figura 1.3. Curve di exitanza spettrale di alcuni corpi conosciuti

mando la prima rispetto alla seconda, è possibile ricostruire una curva caratteristica chiamata *firma di emissione spettrale* che è diversa da radiatore a radiatore.

In fisica, nell'ambito dello studio del trasporto energetico per radiazione, è stato introdotto un concetto molto utile che è quello del cosiddetto *corpo nero*. Esso è un ipotetico oggetto o sostanza capace di assorbire tutta la radiazione incidente su di esso e di emettere la massima quantità di radiazione a tutte le temperature. Quindi è allo stesso tempo un assorbitore e un radiatore perfetto. In natura non esiste un corpo siffatto, per quanto se ne sa, ma molte volte, per descrivere il comportamento del mondo reale, si definiscono modelli che in qualche maniera aiutano nello scopo e questo concetto ha facilitato molto nella formulazione delle leggi fisiche che regolano il comportamento dei radiatori reali e che adesso si andranno a enunciare.

La *legge di Planck* definisce il valore dell'exitanza  $M$  a una data lunghezza d'onda  $\lambda$  caratterizzante un corpo nero che si trovi alla temperatura  $T$ . Questa relazione è espressa come:

$$M_{(\lambda,T)} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left( e^{(C_2/\lambda T)} - 1 \right)} \quad (1.12)$$

dove

$C_1$  e  $C_2$  = costanti universali:



$$C_1 = 37,413 \text{ W cm}^{-2} \mu\text{m}^{-2}$$

$$C_2 = 14.388 \mu\text{m K}.$$

L'importante considerazione che deriva da questa legge è che per ogni corpo, a una data temperatura  $T$ , è possibile conoscere l'andamento dell'exitanza in funzione della lunghezza d'onda, ossia lungo tutto lo spettro elettromagnetico. Si veda per esempio la figura 1.3 dove sono mostrati alcuni corpi conosciuti.

La *legge di Stefan-Boltzmann* mette in relazione la potenza di emissione di un corpo nero (l'exitanza  $M$ ) rispetto alla sua temperatura  $T$ , secondo la seguente equazione:

$$M = \sigma T^4 \quad (1.13)$$

dove  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann che vale  $5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ .

Come si può osservare, il flusso energetico uscente da un corpo nero è direttamente proporzionale alla quarta potenza della temperatura, il che significa che il primo aumenta molto velocemente all'aumentare della seconda. Si noti comunque che questa relazione ha valore per lunghezze d'onda più corte delle microonde, dove invece  $M$  varia come una funzione diretta di  $T$ . In sintesi, la legge di Stefan-Boltzmann sostiene che un radiatore più caldo emette molta più energia per unità di area rispetto a un radiatore più freddo.

I corpi reali, non possedendo le proprietà ideali del corpo nero, tendono a emettere meno energia rispetto a quest'ultimo. Il confronto fra l'exitanza  $M_{\text{eg}}$  di un corpo reale (definito anche come *corpo grigio*) e quella del corpo nero  $M$  può essere definito attraverso il rapporto fra le due grandezze, il cui risultato è una grandezza definita come emissività  $\varepsilon$ . La relazione appena definita è la *legge di Kirchhoff* espressa dalla seguente equazione:

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{eg}}}{M} \quad (1.14)$$

Da essa risulta che l'emissività di un corpo nero è 1, mentre quella di un qualunque corpo grigio è minore di 1. Dato che l'emissività dei corpi reali varia al variare della lunghezza d'onda, si può enunciare la legge appena citata in funzione di quest'ultima:

$$\varepsilon_{(\lambda)} = \frac{M_{\text{eg}(\lambda)}}{M_{(\lambda)}} \quad (1.15)$$

L'emissività spettrale  $\varepsilon_{(\lambda)}$  è una grandezza che indica l'efficienza radiativa di un corpo attraverso l'intero spettro elettromagnetico.

La *legge di Wien* definisce la relazione fra la lunghezza d'onda corrispondente

alla massima exitanza ( $\lambda_{\text{max}}$ ) e la temperatura del corpo nero  $T$ . In particolare, si ha che:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2898}{T} \quad (1.16)$$

Questa equazione mostra che al crescere della temperatura del corpo nero la lunghezza d'onda dominante della radiazione emessa tende a spostarsi lungo lo spettro verso valori piccoli. Un esempio tipico per spiegare questo fenomeno è quello del Sole e della Terra (si veda figura 1.3): il primo ha una temperatura superficiale di circa 6000 K, a cui corrisponde un valore  $\lambda_{\text{max}}$  di  $0,483 \mu\text{m}$ .

La Terra, viceversa, avendo una temperatura della superficie di circa 300 K, emette radiazione nella lunghezza d'onda dominante di  $9,66 \mu\text{m}$ . Ciò effettivamente corrisponde alle osservazioni effettuate, secondo le quali la massima radiazione emessa dal Sole si colloca nella zona del visibile (luce), mentre quella emessa dalla Terra nell'infrarosso termico (calore).

Una conseguenza delle considerazioni appena esposte è che, in generale, i corpi a temperatura più alta tendono a emettere radiazione a lunghezze d'onda più corte, al contrario di quelli a temperatura minore. Il Sole, le stelle, le lampadine a incandescenza, ad esempio, in virtù della loro alta temperatura, emettono radiazione che almeno in parte cade nella regione del visibile, mentre altri corpi più freddi quali, ad esempio, la stessa Terra o gli animali tendono a emettere almeno in parte nella zona dell'infrarosso termico.

## 1.6. L'interazione della radiazione con l'atmosfera

Indipendentemente dalla sorgente, tutta la radiazione registrata dai sensori per l'osservazione della Terra passa per una certa porzione di atmosfera. Per esempio, un sensore montato su una piattaforma satellitare rileva la radiazione elettromagnetica che, dopo aver attraversato una prima volta tutto lo spessore dell'atmosfera provenendo dal Sole, lo attraversa una seconda dopo essere stata riflessa dalla superficie terrestre. Un sensore termico aerotrasportato registra la radiazione infrarossa emessa dalla Terra, che invece attraversa l'atmosfera una sola volta, dalla superficie terrestre al sensore.

L'effetto dell'atmosfera sulla radiazione elettromagnetica può essere definito genericamente di "disturbo". Si vedrà più avanti in cosa consiste questo disturbo. Innanzitutto va detto che questo effetto varia al variare di diversi parametri, quali:

- la lunghezza del percorso della radiazione nell'atmosfera;
- la magnitudine del segnale elettromagnetico registrato;
- le condizioni atmosferiche;
- la lunghezza d'onda della radiazione coinvolta.

In generale, l'atmosfera può avere un profondo effetto sull'intensità e la composizione spettrale della radiazione che verrà captata da un sensore. Questi effetti sono causati da due meccanismi: quello di *diffusione* e quello di *assorbimento* atmosferico.

La diffusione atmosferica è un processo imprevedibile per il quale la radiazione elettromagnetica, collidendo con le particelle presenti nell'atmosfera, viene dispersa in varie direzioni. Si distinguono tre tipi di diffusione:

- di *Rayleigh*;
- di *Mie*;
- *non selettiva*.

La diffusione di Rayleigh avviene quando l'energia elettromagnetica interagisce con molecole presenti nell'atmosfera le cui dimensioni sono molto più piccole rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione. L'effetto della diffusione di Rayleigh è inversamente proporzionale alla quarta potenza della lunghezza d'onda; ne consegue che la radiazione a piccola lunghezza d'onda viene diffusa maggiormente rispetto a quella a grande lunghezza d'onda. Questo tipo di diffusione è responsabile del colore blu del cielo, poiché la radiazione nella regione spettrale del blu ( $0,4-0,5 \mu\text{m}$ ) viene dispersa molto di più rispetto a quella a lunghezze d'onda maggiori. La porzione di radiazione nel blu è talmente diffusa che ci appare provenire da tutte le direzioni, donando così al cielo il suo colore. Fra l'altro, più si sale di quota, per esempio in alta montagna o a bordo di un aeroplano e più il blu diventa scuro, in virtù del fatto che la diffusione è sempre minore, diminuendo lo spessore di atmosfera da attraversare. Superata l'atmosfera poi il cielo appare nero. Un esempio sono le fotografie scattate dagli astronauti sulla Luna, dove è visibile il cielo nero nonostante vi sia illuminazione solare.

Nelle immagini telerilevate la diffusione di Rayleigh produce un effetto tipico di foschia che toglie contrasto all'immagine stessa, rendendola offuscata.

La diffusione di Mie si ha quando la radiazione EM interagisce con particelle delle dimensioni confrontabili con la lunghezza d'onda dell'energia registrata. Particelle di questo tipo sono quelle del vapor acqueo e della polvere. Questa diffusione interessa lunghezze d'onda più grandi rispetto a quella di Rayleigh.

Esiste infine un ultimo tipo di diffusione che è definita, come si è detto poc'anzi, *non selettiva* e che si ha quando la radiazione interagisce con particelle molto più grandi della lunghezza d'onda (tipicamente le gocce d'acqua) con dimensioni comunemente comprese fra  $5$  e  $100 \mu\text{m}$ . Proprio perché interessa indistintamente tutte le lunghezze d'onda del visibile, infrarosso vicino e medio, questo tipo di diffusione viene definita non selettiva. A causa di ciò, i corpi atmosferici contenenti acqua, come le nuvole o la nebbia, appaiono bianchi o biancastri poiché l'insieme di tutti i colori combinati in proporzioni uguali produce la luce bianca. La radiazione a lunghezze d'onda maggiori dell'infrarosso medio, come ad esem-

pio le microonde, non risente di questa diffusione ed è per questo che i radar riescono ad acquisire immagini della superficie terrestre anche con copertura nuvolosa.

In contrapposizione alla diffusione, l'assorbimento atmosferico si traduce in un'effettiva perdita di energia. Di solito, l'assorbimento è selettivo, cioè avviene a determinate lunghezze d'onda. Il vapor acqueo ( $\text{H}_2\text{O}$ ), l'anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) e l'ozono ( $\text{O}_3$ ) sono tipici assorbenti dell'energia elettromagnetica solare. Dal momento che questi gas assorbono specifiche lunghezze d'onda, determinano anche dove il sensore può vedere spettralmente.

Gli intervalli di lunghezza d'onda nei quali l'atmosfera è particolarmente trasmisiva per l'energia EM (cioè dove non assorbe) sono definiti *finestre atmosferiche*. In figura 1.4 è mostrato un diagramma della *trasmissione* o trasmissione atmosferica. Questa grandezza, espressa in percentuale, definisce la quantità di energia che passa attraverso l'atmosfera in funzione della lunghezza d'onda.

Dove la curva mostra dei picchi, si hanno le cosiddette *finestre di trasmissione atmosferica*, mentre le zone depresse denotano il blocco della radiazione a opera dei diversi gas assorbenti. Vale la pena notare che la regione del visibile, che è l'unica zona di osservazione dell'occhio umano, è una finestra atmosferica e, facendo riferimento alle curve di exitanza (figura 1.3), si potrà constatare che proprio qui si ha il maggior valore di questa grandezza per quanto concerne il Sole. La massima exitanza della Terra si ha invece per valori di lunghezza d'onda intorno a  $9-10$  micron, dove è presente un'altra finestra di trasmissione. Importanti zone di assorbimento dovute al vapor acqueo, che saranno citate più avanti, si trovano invece nell'infrarosso vicino e medio e hanno importanti implicazioni nel monitoraggio dello stato di salute della vegetazione.

La radiazione emessa dalla Terra viene registrata da sensori cosiddetti *termici*, le cui finestre di osservazione si trovano fra  $3$  e  $5 \mu\text{m}$  e fra  $8$  e  $14 \mu\text{m}$ .

I sensori *multispettrali* registrano la radiazione attraverso molti intervalli, per lo più stretti, di lunghezze d'onda. Questi intervalli, che prendono il nome di *bande*, sono localizzati in vari punti dello spettro, dal visibile all'infrarosso termico.

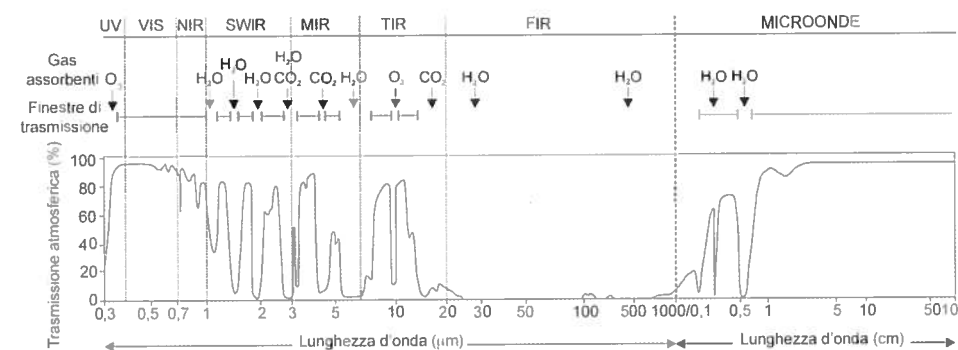


Figura 1.4. Trasmissione atmosferica e finestre di assorbimento dovute ai diversi gas



La considerazione che deriva dall'analisi della figura 1.4 è che esiste una stretta interdipendenza fra le sorgenti primarie di energia, le finestre atmosferiche attraverso le quali l'energia può essere trasmessa e la sensibilità spettrale del sensore utilizzato per registrare la radiazione.

In sostanza, la scelta del sensore e delle bande spettrali da usare per i diversi scopi è condizionata dalla loro capacità di registrare la radiazione nelle finestre atmosferiche e dalla magnitudine e composizione spettrale dell'energia disponibile in quelle finestre.

Come si avrà modo di trattare nel prossimo capitolo, i sensori per il telerilevamento sono realizzati in modo tale che le loro bande spettrali siano posizionate in maniera efficace rispetto alle finestre atmosferiche, così da poter registrare la radiazione nelle zone di maggior trasmissività.

La scelta di un sensore rispetto a un altro dipende soprattutto dal numero delle bande e dal loro posizionamento rispetto allo spettro elettromagnetico, poiché è il modo in cui l'energia interagisce con gli elementi sotto osservazione (la superficie terrestre) che porta a utilizzare una banda spettrale piuttosto che un'altra per l'interpretazione. Di questo ci si occuperà nel prossimo paragrafo.

### 1.7. L'interazione della radiazione con la superficie terrestre

Quando la radiazione elettromagnetica incide su una qualunque superficie, si verificano tre fondamentali fenomeni (figura 1.5):

- la *riflessione*;
- l'*assorbimento*;
- la *trasmissione*.

Normalmente i tre fenomeni si realizzano in proporzioni relativamente diverse a seconda delle caratteristiche della superficie e della radiazione.

Dato che l'energia non si crea né si distrugge, per il principio di conservazione, si può scrivere che:

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t \quad (1.17)$$

dove

- $\Phi_i$  = flusso di energia radiante incidente
- $\Phi_r$  = flusso riflesso
- $\Phi_a$  = flusso assorbito
- $\Phi_t$  = flusso trasmesso.

Ne consegue che il flusso di energia radiante incidente è uguale alla somma delle tre componenti di flusso: riflessa, assorbita e trasmessa. Normalizzando queste componenti rispetto al flusso incidente, è possibile definire tre grandezze:

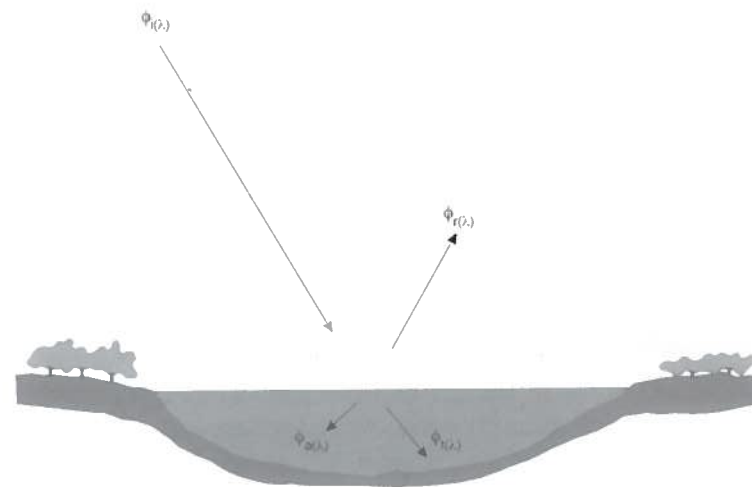


Figura 1.5. Processo di interazione della radiazione em incidente con la superficie terrestre

- il coefficiente di riflessione, chiamato anche *riflettività*  $\rho = \Phi_r/\Phi_i$ ;
- il coefficiente di assorbimento o *assorbività*  $\alpha = \Phi_a/\Phi_i$ ;
- il coefficiente di trasmissione o *trasmissività*  $\tau = \Phi_t/\Phi_i$ .

La proporzione con cui le tre componenti sopra definite si combinano è strettamente dipendente dalla natura della superficie su cui la radiazione incide. Ad esempio, la riflessione è un fenomeno che dipende dalla natura e dalla scabrosità della superficie: se questa presenta irregolarità di dimensioni inferiori alla lunghezza d'onda della radiazione incidente, essa si comporterà come uno specchio e si avrà una riflessione della radiazione con un angolo uguale a quello di incidenza. Questo tipo di riflessione si chiama *speculare*.

Se, viceversa, le irregolarità hanno dimensioni confrontabili o maggiori della lunghezza d'onda della radiazione incidente, la superficie sarà definita *lambertiana* e la riflessione avverrà in maniera diffusa, più o meno uniformemente in tutte le direzioni. In natura, le superfici hanno comportamenti intermedi fra le superfici speculari e quelle lambertiane. La radiazione diffusa è responsabile del colore degli oggetti. È importante sottolineare che le componenti di energia riflessa, assorbita e trasmessa nel momento in cui la radiazione EM incide una superficie sono dipendenti anche dalla lunghezza d'onda della radiazione stessa. Per questo motivo, la (1.17) può essere scritta in funzione di  $\lambda$  come segue:

$$\Phi_{i(\lambda)} = \Phi_{r(\lambda)} + \Phi_{a(\lambda)} + \Phi_{t(\lambda)} \quad (1.18)$$

Da essa si ricava che i tre coefficienti di riflettività, assorbività e trasmissività variano anch'essi in funzione della lunghezza d'onda e possono quindi essere indicati come  $\rho_{(\lambda)}$ ,  $\alpha_{(\lambda)}$  e  $\tau_{(\lambda)}$ .



In particolare, di questi tre coefficienti, assume particolare importanza la riflettività, poiché i sensori di telerilevamento per l'osservazione della Terra rilevano principalmente la radiazione riflessa dalla superficie di quest'ultima. Quando viene considerata in funzione della lunghezza d'onda,  $\rho_{(\lambda)}$  viene definita *riflettività spettrale* ( $\rho_{(\lambda)} = \Phi_{r(\lambda)} / \Phi_{i(\lambda)}$ ) e, se espressa in percentuale, prende il nome di *riflettanza spettrale*. L'andamento spettrale della riflettività varia a seconda del tipo di superficie su cui incide la radiazione EM e anzi caratterizza in maniera distintiva il tipo di superficie. Per questo motivo esso viene anche chiamato *firma spettrale*. Il prossimo paragrafo tratterà in maggior dettaglio proprio questo argomento.

### 1.8. Le firme spettrali

La percentuale del flusso di energia radiante incidente su un corpo che viene riflessa, per una data lunghezza d'onda, definita nel paragrafo precedente *riflettanza spettrale*, è funzione delle caratteristiche geometriche, della natura e della composizione del corpo stesso. Ad esempio, il contenuto d'acqua di un suolo o il contenuto di clorofilla della vegetazione sono fattori che influiscono fortemente sulla riflettanza. L'acqua infatti tende in generale ad abbassare la riflettanza di tutti quei corpi che la contengono, mentre la presenza di clorofilla determina un assorbimento della radiazione nell'intervallo spettrale del rosso e una forte riflessione in quello dell'infrarosso vicino.

In sostanza, è possibile analizzare il valore della riflettanza spettrale di un corpo in relazione alle varie lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico. Questa analisi porta a realizzare una curva in uno spazio bidimensionale, dove sull'asse delle ordinate è rappresentata la riflettanza e su quello delle ascisse la lunghezza d'onda.

Una curva così costruita è detta *firma spettrale* in quanto caratteristica distintiva, come la firma di una persona, della risposta di un particolare corpo alla radiazione incidente lungo tutto lo spettro elettromagnetico. La figura 1.6 mostra alcune tipiche firme spettrali di oggetti come la vegetazione, l'acqua e il suolo. È possibile tracciare virtualmente la firma spettrale di qualunque materiale: rocce, minerali, diversi tipi di vegetazione in diversi stati evolutivi o di salute, ecc.

La firma spettrale dei diversi tipi di elementi osservabili sulla superficie terrestre costituisce un utile strumento per sapere quali finestre o bande spettrali scegliere per riconoscerli nelle immagini e per differenziarli da altri elementi. Considerando ancora la figura 1.6, si può notare che la vegetazione (qui rappresentata da boschi di conifere e latifoglie) assume valori particolarmente alti nella zona spettrale corrispondente a circa  $0,8 \mu\text{m}$ , corrispondente all'infrarosso vicino; infatti, è proprio in questa regione che le piante, in virtù del processo di fotosintesi clorofilliana, hanno la loro massima riflettanza. Un altro picco di riflettanza un po' più basso dovuto a tale attività è nel visibile, nella regione del verde (circa

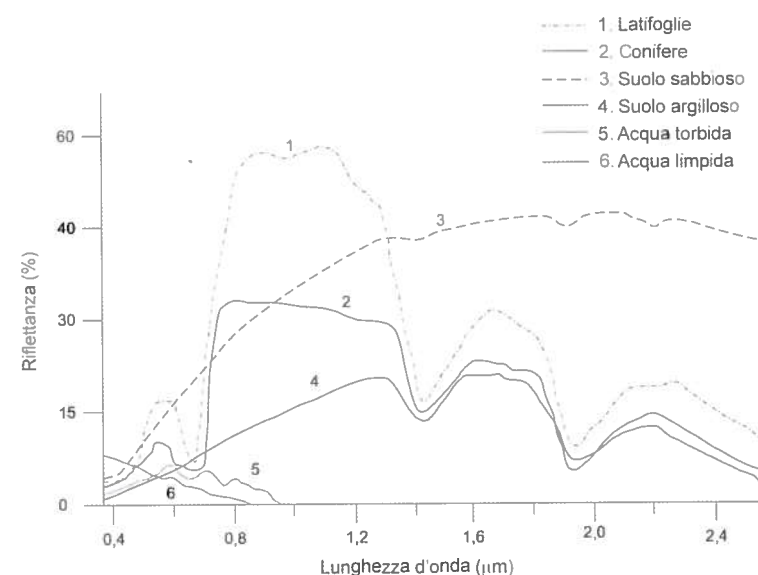


Figura 1.6. Firme spettrali di alcune tipiche superfici

$0,55 \mu\text{m}$ ) ed è per questo che l'uomo percepisce la vegetazione di colore verde, non essendo capace di "vedere" nell'infrarosso. Il suolo, invece, tende ad avere i valori massimi intorno a  $1,7 \mu\text{m}$ , nella regione dell'infrarosso medio. L'acqua ha massima riflettanza nel visibile nella regione del blu e poi va a scendere fino ad avere valori di  $\rho$  pari a zero quando si entra nell'infrarosso vicino. Per questo motivo, se si osserva uno specchio d'acqua (specialmente se profondo) nell'infrarosso, lo si vede nero.

Prendendo in considerazione le relazioni reciproche fra le varie superfici, se si volesse discriminare la vegetazione dal suolo nudo, si dovrebbe identificare la regione spettrale dove la differenza di riflettanza fra i due elementi è massima. Questa regione, dall'analisi della figura 1.6, risulta essere quella intorno a  $0,8$  micrometri, proprio dove la vegetazione ha il suo massimo. In questa regione sarebbe invece più difficile discriminare la neve dalla vegetazione, in quanto la prima ha una riflettanza altissima in tutto il visibile e nell'infrarosso vicino, per poi calare bruscamente intorno a  $1,4 \mu\text{m}$ . Una qualunque banda spettrale nel visibile o nell'infrarosso vicino ci permetterebbe quindi di separare meglio le due diverse superfici.

Più difficile può risultare la separazione fra tipi diversi di suolo o di vegetazione. In entrambi i casi si tratta di identificare la regione spettrale dove la differenza di riflettanza fra gli elementi a confronto è massima. Un caso tipico è quello della separazione fra boschi di conifere e boschi di latifoglie. L'andamento delle due curve nel visibile è molto vicino, rendendo la discriminazione alquanto difficile. Appena si entra nell'infrarosso vicino, le curve si separano piuttosto nettamente:

le conifere restano su valori di riflettanza bassi (30%), mentre le latifoglie salgono al 50% e oltre. Questa differenza è dovuta proprio alle caratteristiche intrinseche delle foglie dei due tipi di albero. Una conifera è dotata di foglie aghiformi dalla superficie molto ridotta, mentre le latifoglie, come dice il nome stesso, hanno foglie dalla superficie ampia. La radiazione incidente sulla superficie fogliare sarà maggiormente riflessa se l'area della foglia è più ampia: ne consegue che le latifoglie tendono a riflettere la radiazione più delle conifere. In un'immagine telerilevata in cui la riflettanza è rappresentata con una scala di grigio, dal nero (minima riflettanza) al bianco (massima riflettanza), nella regione dell'infrarosso vicino i boschi di latifoglie appariranno più chiari e quelli di conifere più scuri. Un'altra caratteristica importante della vegetazione è il suo contenuto d'acqua, che rappresenta, tra l'altro, un indice di salute delle piante. Lungo lo spettro elettromagnetico, a lunghezze d'onda pari a 1,4, 1,9 e 2,7  $\mu\text{m}$ , la presenza d'acqua determina un forte assorbimento della radiazione. Qualunque oggetto la contenga tenderà quindi ad avere una bassa riflettanza in questa regione spettrale. Di contro, l'assenza d'acqua determinerà un'alta riflettanza. In base a ciò, osservando la vegetazione in queste bande spettrali, sarà possibile avere un'idea del suo stato di stress idrico, ottenendo utili indicazioni nelle applicazioni forestali e agronomiche del telerilevamento.

Sempre a proposito di acqua, si è osservato che, entrando nella regione dell'infrarosso vicino, la riflettanza dell'acqua tende praticamente a zero: ciò risulta vero per acqua limpida e profonda. Esistono tuttavia due casi in cui, in questa regione spettrale, l'acqua non risulta nera (riflettanza uguale a zero): fondale basso e presenza di sedimenti in sospensione. Se l'acqua è poco profonda, la radiazione nell'infrarosso, grazie al suo ridotto potere penetrativo, riesce ad andare a colpire il materiale che compone il fondale, venendo poi parzialmente riflessa. Se l'acqua contiene particelle in sospensione (tipicamente materiale sedimentario come sabbie e limi), quindi è torbida, saranno loro stesse a riflettere la radiazione infrarossa. Se l'acqua in una immagine ripresa nell'infrarosso vicino non risulta nera, è pertanto possibile che si tratti di uno di questi due casi. Comunemente, l'acqua non risulta nera lungo le coste basse o in laghi poco profondi oppure, per il secondo motivo, alla foce dei fiumi o lungo il corso degli stessi.

Alla luce di tali riflessioni appare chiaro che capire e conoscere le firme spettrali è un passaggio fondamentale nel telerilevamento e nella fotointerpretazione. Solo una volta compreso come i differenti elementi presenti sulla superficie terrestre, quali rocce, suoli, vegetazione, corpi idrici, ecc., interagiscono con la radiazione elettromagnetica, si è in grado di leggere e interpretare correttamente le immagini prodotte dai sensori.

## 2. SISTEMI DI RIPRESA

### 2.1. Cenni introduttivi

L'osservazione della Terra può essere effettuata mediante strumenti chiamati *sensori*, di cui esistono varie tipologie, montati su diversi supporti, chiamati *piattaforme*. In senso lato, si può considerare come il primo e più naturale dei sensori l'occhio e il corpo umano come la sua piattaforma. Dal punto di vista dell'uomo, il sensore occhio osserva la superficie terrestre nella finestra spettrale del visibile, registrando immagini nel cervello. Tali registrazioni tuttavia non sono permanenti e tendono a deteriorarsi nel tempo e con l'avanzare dell'età.

Fra i sensori non naturali costruiti dall'uomo vi sono le camere fotografiche tradizionali che registrano su pellicole a emulsione e i sensori digitali. Questi ultimi, sia nel telerilevamento sia nella vita di tutti i giorni, si stanno affermando su larga scala, se si considera che sono impiegati sulle ormai diffusissime fotocamere digitali. Un sensore può essere montato su differenti tipi di piattaforma:

- al suolo, tipicamente su di un braccio sollevabile montato su un veicolo;
- aerea, su aeroplani o palloni aerostatici;
- satellitare, se il veicolo è in orbita attorno alla Terra.

I vari tipi di sensore, accoppiati a una determinata piattaforma, danno come prodotto delle loro registrazioni un'immagine le cui caratteristiche, diverse a seconda del sensore e della piattaforma, saranno illustrate nel prossimo capitolo. In generale, si può dire che al momento il tipo di immagine più utilizzata nel telerilevamento è l'immagine digitale, costituita da una matrice di celle dette *pixel*, ciascuna delle quali porta con sé l'informazione relativa all'energia riflessa dalla superficie terrestre.

In questo capitolo verranno trattati in generale i vari tipi di sensore e di piattaforma, illustrandone caratteristiche e funzionamento. Si passeranno poi in rassegna i vari tipi di sensore disponibili sul mercato per le applicazioni del telerilevamento.

### 2.2. Sensori attivi e passivi

Nel telerilevamento per l'osservazione della Terra sono utilizzati due diversi tipi



di sensore: quello cosiddetto *passivo* e quello *attivo*.

I sensori passivi registrano la radiazione elettromagnetica proveniente da un oggetto, sia essa riflessa o emessa, ma comunque naturalmente disponibile. È evidente che la principale sorgente di energia elettromagnetica è il Sole e la radiazione che la maggior parte dei sensori per il telerilevamento capta è quella solare riflessa dalla superficie terrestre (figura 2.1). Per questo motivo, tali sensori hanno bisogno del Sole per poter registrare l'energia proveniente dalla Terra e questo significa che il loro funzionamento è limitato alle ore diurne. Inoltre, misurando unicamente energia riflessa, in caso di copertura nuvolosa il sensore capterà la radiazione solare riflessa dalle nuvole, rendendo impossibile l'osservazione della superficie terrestre sottostante. In ogni caso, i sensori ottici passivi sono i più diffusi per l'osservazione della Terra, anche perché, operando nel campo della radiazione visibile e dell'infrarosso, forniscono immagini che si avvicinano molto come aspetto alle foto aeree, facilitando così la loro interpretazione.

I sensori attivi generano essi stessi la radiazione da inviare verso la superficie terrestre, registrandone poi la componente riflessa attraverso un'antenna (figura 2.2). Grazie alla loro natura di sorgente energetica, questi sensori possono operare anche in assenza di radiazione solare. Inoltre, dato che le lunghezze d'onda del segnale emesso sono piuttosto grandi, trovandosi nella zona spettrale delle microonde, tali sensori possono osservare la superficie terrestre anche in presenza di nuvole. Le particelle di vapor acqueo, infatti, sono più piccole della lunghezza d'onda del segnale emesso e sono perciò da esso per così dire "scavalcate". Tipico sensore attivo è il *radar* (acronimo per *Radio Detection And Ranging*) di cui un particolare modello è il radar ad apertura sintetica (*SAR, Synthetic Aperture*

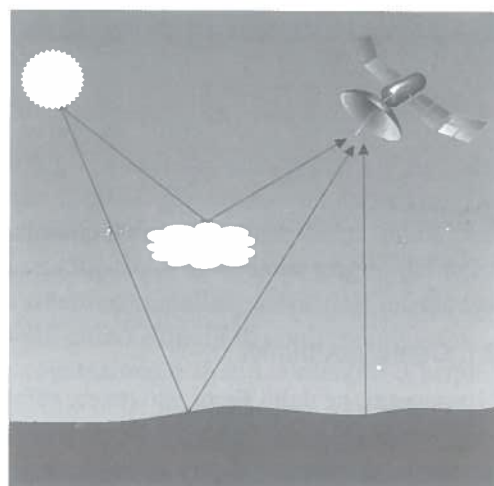


Figura 2.1. Funzionamento di un sensore passivo

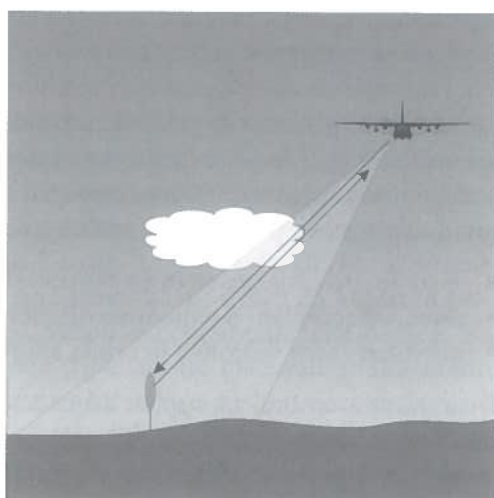


Figura 2.2. Funzionamento di un sensore attivo

*Radar*). Un altro è il *lidar* (o *Laser Imaging Detection And Ranging*), il quale però opera nel campo compreso fra l'ultravioletto e l'infrarosso vicino, emettendo impulsi o fasci laser verso terra e registrando la parte di radiazione riflessa. Data la loro maggiore diffusione, in questo testo saranno trattate esclusivamente le immagini dei sensori ottici di tipo passivo.

### 2.3. I tipi di piattaforma per il telerilevamento

Il telerilevamento fa uso di tre differenti piattaforme:

- satellitari;
- aeree;
- al suolo.

Ogni piattaforma costituisce un veicolo per uno o più sensori e non è raro che ne monti due, tre o più contemporaneamente. Il satellite europeo *Envisat*, per esempio, supporta addirittura nove diversi sensori.

#### 2.3.1. Piattaforme satellitari

Lo studio della superficie terrestre da distanze orbitali è quello che più tipicamente viene oggi effettuato nell'ambito del telerilevamento. Per questo le immagini generate da sensori montati su satelliti sono quelle che vengono più usate, grazie alle loro caratteristiche che le rendono convenienti rispetto ad altre immagini acquisite da piattaforme diverse. Una di queste è la frequenza di rivisitazione di uno stesso luogo sulla superficie terrestre, grazie alla notevole velocità di rivoluzione intorno al nostro pianeta, che permette di osservare l'evoluzione di determinati fenomeni relativamente rapidi, come ad esempio quelli legati al dissesto idrogeologico.

Le piattaforme satellitari possono essere strumenti automatici, messi in orbita attorno alla Terra da vettori o navicelle e/o stazioni spaziali con equipaggio umano a bordo. I più diffusi sono i satelliti automatici, che garantiscono un funzionamento pluriennale senza il continuo intervento umano. Le navicelle spaziali acquisiscono immagini della superficie terrestre esclusivamente nel corso delle loro missioni in orbita e non sistematicamente.

Le varie piattaforme orbitali si spostano a quote diverse dalla superficie terrestre (si veda figura 2.3): le navicelle tipo lo *Space Shuttle* orbitano a circa 200 km di altezza, mentre i satelliti si trovano a quote maggiori. In particolare, i satelliti per l'osservazione della Terra si trovano fra 450 e 900 km di altezza. Sopra a essi si possono trovare i satelliti della costellazione GPS a 20.000 km e i satelliti meteorologici geostazionari a 36.000 km.

I satelliti possono trovarsi su vari tipi di orbita (figura 2.4):



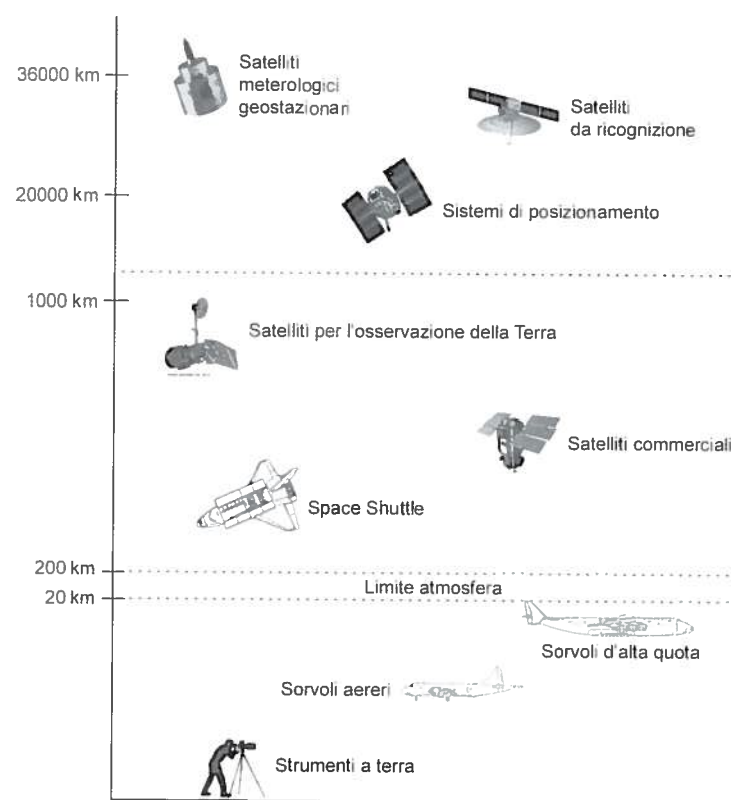


Figura 2.3. Quote operative dei vari tipi di sensore

- equatoriale;
- polare;
- quasi-polare.

L'orbita equatoriale (figura 2.4a) prevede che il piano orbitale coincida con il piano dell'equatore. Se la velocità del satellite è geosincrona, ovvero uguale alla velocità di rotazione della Terra, l'orbita sarà *geostazionaria*, perché il satellite si troverà sempre sulla medesima verticale. È questo il caso del più famoso fra i satelliti meteorologici, il *Meteosat*, attualmente arrivato alla seconda generazione, che sta costantemente sulla verticale del Golfo di Guinea e osserva sempre la stessa porzione di superficie terrestre.

In relazione alle orbite dei satelliti, si segnala un dato interessante da utilizzare in *Google Earth*: si tratta di un file .kmz che mostra la posizione in tempo reale di tutti i satelliti artificiali e altri manufatti orbitanti intorno alla Terra ([adn.agi.com/SatelliteDatabase/SatelliteDatabase.kmz](http://adn.agi.com/SatelliteDatabase/SatelliteDatabase.kmz)). Dopo averlo scaricato dall'indirizzo indicato, posto che si abbia *Google Earth* installato sul proprio PC ([earth.google.com](http://earth.google.com)), si può visualizzarlo facendo doppio clic sul file.

Un satellite la cui orbita sia polare (figura 2.4b) contiene nel proprio piano orbitale l'asse di rotazione della Terra. Tale satellite, a ogni successiva orbita, attraversa l'equatore in tempi differenti e quindi è in grado di vedere una medesima zona in diverse condizioni di illuminazione. Questa condizione non è però molto utile e per questo hanno molta più diffusione le orbite quasi-polari eliosincrone (figura 2.4c-d). In questa configurazione, il satellite ha il piano orbitale che forma un angolo qualunque con l'asse polare (anche se generalmente è un angolo piccolo) e, caratteristica molto importante, ha l'orbita sincronizzata con il Sole per cui, a

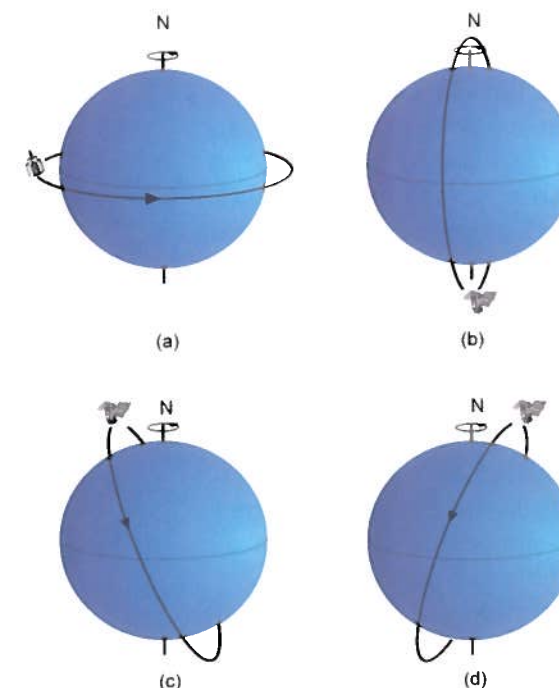


Figura 2.4. Varie tipologie di orbita dei satelliti per l'osservazione della Terra

ogni successivo passaggio, transita su un determinato punto della superficie terrestre sempre alla stessa ora e quindi con le stesse condizioni di illuminazione. I sensori che seguono questo tipo di orbita risultano strumenti ideali per l'osservazione della Terra, in quanto la possibilità di avere immagini di una stessa porzione di superficie terrestre sempre con le stesse condizioni di illuminazione le rende confrontabili fra loro e permette quindi di valutare l'evoluzione del territorio (tramite un'analisi cosiddetta *multitemporale*).

### 2.3.2. Piattaforme aeree

A una quota nettamente inferiore rispetto ai satelliti si trovano le piattaforme aeree costituite non soltanto da aeroplani, ma anche da elicotteri e palloni aerostatici. Questi ultimi, fra l'altro, rappresentano le più antiche piattaforme usate per il telerilevamento, quando James Wallace Black, il 13 ottobre del 1860, scattò le prime foto aeree da un pallone aerostatico frenato sopra la città di Boston a una quota di circa 365 m (figura 2.5).

La piattaforma aerea più utilizzata resta comunque l'aeroplano, che può volare a quote molto varie, da 300 a 6.000 m per osservazioni locali dettagliate, fino a 20.000 m per coprire aree più estese.

Le piattaforme aeree acquisiscono immagini sia analogiche che digitali. La frequenza con cui si rendono disponibili foto aeree di una certa zona è molto variabile: per i catasti agricoli, ogni anno vengono realizzate coperture fotografiche di tutta l'Italia; le regioni commissionano periodicamente voli di parte o dell'intero loro territorio; compagnie private realizzano ortofoto a livello nazionale all'incirca ogni cinque anni. La disponibilità di copertura fotografica sul territorio italiano è quindi piuttosto buona.

Per avere cadenze ancora più frequenti è tuttavia necessario commissionare espressamente un volo, per il quale i costi saranno sensibilmente maggiori rispetto ai prodotti di certi sensori satellitari. Il vantaggio delle piattaforme aeree è che, nel momento in cui si commissiona un volo, si possono scegliere tutti i parametri di data, ora, nonché quota di ripresa, ottenendo pertanto immagini aventi in generale una definizione maggiore rispetto ai sensori satellitari ad alta risoluzione.

### 2.3.3. Piattaforme al suolo

Tutti i sistemi di osservazione a distanza che siano in qualche modo vincolati alla superficie terrestre possono essere annoverati fra le piattaforme al suolo. Per esempio un veicolo che possieda un braccio estendibile in cima al quale sia posto lo strumento di rilevazione è una piattaforma al suolo (figura 2.6) ed è, fra l'altro, il caso più tipico. Le altezze massime che si possono ottenere con questi sistemi sono di circa 15 m e questo limita gli scopi per cui sono utilizzati. Di solito, infatti, le piattaforme al suolo montano degli strumenti chiamati *spettrometri*, che servono a determinare le firme spettrali delle superfici. Dato che questi strumenti sono in grado di osservare piccole porzioni di superficie terrestre (a causa anche

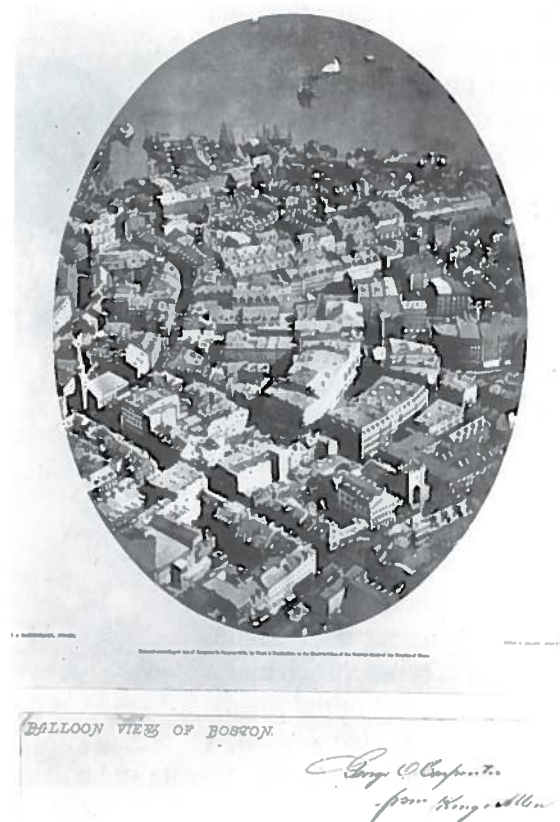


Figura 2.5. Vista di Boston ripresa da James Wallace Black nel 1860

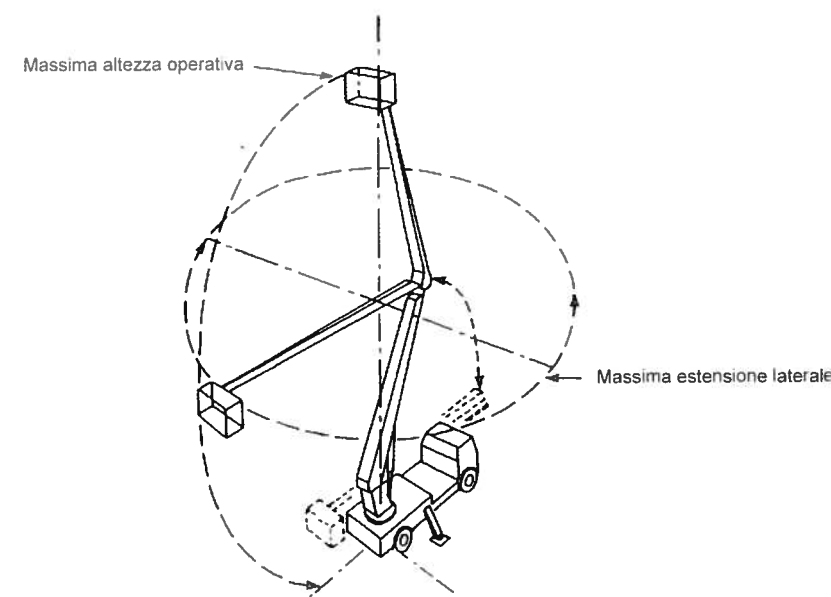


Figura 2.6. Esempio di piattaforma a terra con veicolo

della limitata altezza di osservazione), essi sono principalmente usati per raccogliere la verità a terra per la taratura delle immagini da satellite. Va detto, a proposito, che l'immagine da satellite e la verità a terra da piattaforma al suolo devono essere riprese nello stesso momento per poter essere confrontabili.

### 2.4. I sensori per il telerilevamento

In questo paragrafo saranno illustrati i principali sensori ottici passivi per il telerilevamento, analizzando la loro struttura e il loro funzionamento.

In generale, i sensori ottici passivi possono essere divisi in due grandi categorie: fotografici e non fotografici; i primi generano una registrazione della radiazione riflessa e/o emessa dal bersaglio su una pellicola fotografica che viene successivamente stampata su carta fotografica; i secondi codificano la radiazione registrata in formato digitale, memorizzando le immagini prodotte su supporti informatici per poi essere analizzate a video o stampate. Inoltre, i sensori fotografici operano nella regione spettrale del visibile e dell'infrarosso vicino (da 0,3 a 0,9  $\mu\text{m}$ ), mentre quelli non fotografici spaziano dai raggi x alle microonde, quindi praticamente su tutto lo spettro EM.

I sensori fotografici montati su piattaforme per il telerilevamento sono rappresentati essenzialmente da camere fotografiche. Questi apparecchi, sebbene diversi da quelli comunemente utilizzati per le riprese amatoriali da terra, si basano sul medesimo funzionamento: l'immagine inquadrata viene registrata da un'emulsione



presente sulla pellicola fotografica e il prodotto che si ottiene tramite reazioni fotochimiche è un negativo dell'immagine reale. Dato che le pellicole per riprese aeree sono di grande formato, l'immagine positiva si ottiene tramite stampa detta *a contatto* su un foglio di carta fotografica, anch'esso fotosensibile grazie a un'emulsione, senza passare attraverso un ingranditore.

Fino agli anni '60, i sensori utilizzati per il telerilevamento erano esclusivamente di tipo fotografico. Con l'inizio degli anni '70 e la messa in orbita del primo satellite Landsat, i sensori non fotografici hanno cominciato a prendere campo. Attualmente, a parte le camere fotografiche montate su aereo, la quasi totalità di sensori è di tipo non fotografico. Va detto, fra l'altro, che anche nel telerilevamento aereo, stanno prendendo sempre più campo le camere fotografiche digitali, con la conseguenza che quelle tradizionali andranno progressivamente scomparendo. Nel sottoparagrafo 2.4.1 si descriveranno in dettaglio questi strumenti, mentre nel paragrafo 2.5 si illustrerà la caratteristica fondamentale dei sensori: la *risoluzione*. Una trattazione sui sistemi fotografici è invece presente nel volume secondo di *L'osservazione della Terra – Fotointerpretazione*.

#### 2.4.1. Sensori ottici passivi non fotografici

Il sensore ottico passivo non fotografico più diffusamente utilizzato nel telerilevamento è il cosiddetto *sensore ad accoppiamento di carica*, chiamato anche CCD (*Coupled Charge Detector*), che misura e registra la radiazione ed è poi in grado di tradurla in un'immagine digitale.

Un CCD è un circuito integrato formato da una striscia o da una griglia di elementi semiconduttori, definiti anche *rilevatori* (*detectors* in inglese), capaci di accumulare una carica elettrica (da qui *charge*) proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica che li colpisce. Questi elementi sono accoppiati (*coupled*) in modo che ognuno di essi, sollecitato da un impulso elettrico, possa trasferire la propria carica all'elemento adiacente. Quando la radiazione colpisce il sensore e quindi i rilevatori, viene rilasciato un flusso di elettroni, quindi un segnale elettrico analogico proporzionale all'intensità dell'energia incidente. Attraverso un campionamento digitale, questo segnale viene trasformato in numeri interi digitali, definiti con termine inglese *digital numbers* (DN). Il DN rappresenta pertanto il valore numerico digitale codificato dell'energia elettromagnetica che ha colpito il rilevatore. Nel prosieguo del paragrafo saranno definiti più in dettaglio i criteri con cui sono codificati i DN.

Il sensore CCD può essere montato in modi differenti per raccogliere la radiazione proveniente dalla superficie terrestre. Esistono tre diverse geometrie di ripresa:

- centrale a matrice;
- non centrale a scansione puntuale (*whisk-broom*);
- non centrale a scansione lineare (*push-broom*).

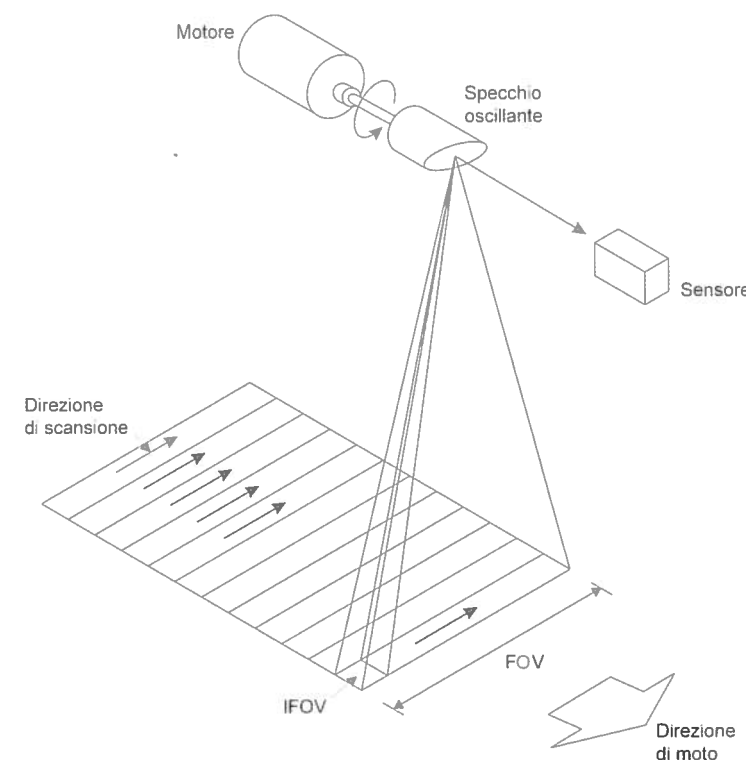


Figura 2.7. Schema di funzionamento dello scanner whisk-broom

La grande differenza fra queste tre geometrie di ripresa è che, mentre quella centrale acquisisce tutta l'immagine nello stesso istante, i sistemi non centrali, definiti anche *a scansione*, acquisiscono l'intera scena attraverso la mosaicatura di sotto-scene. In particolare, nel sistema *whisk-broom* le sotto-scene sono costituite da singole celle, mentre nel sistema *push-broom* sono singole righe.

Il sensore a matrice è costituito, come indica il suo stesso nome, da una matrice di rilevatori CCD, secondo forme quadrate o rettangolari. Il sensore registra l'immagine in una singola esposizione come le tradizionali camere fotografiche.

Lo *scanner whisk-broom* utilizza un singolo rilevatore CCD lineare che riesce ad acquisire la scena attraverso un sistema meccanico oscillante. Uno specchio viene fatto oscillare ortogonalmente alla traiettoria di volo della piattaforma in modo da riflettere la radiazione sul CCD e acquisire così una riga di immagine. Muovendosi lungo l'orbita, il CCD, all'oscillazione successiva dello specchio può acquisire una riga adiacente alla precedente. Proseguendo, tutta un'immagine viene acquisita, cella dopo cella, riga dopo riga (figura 2.7). Questo sistema è stato il primo utilizzato dalla serie dei satelliti Landsat.

Lo *scanner push-broom* è costituito da una barretta statica di rilevatori CCD in



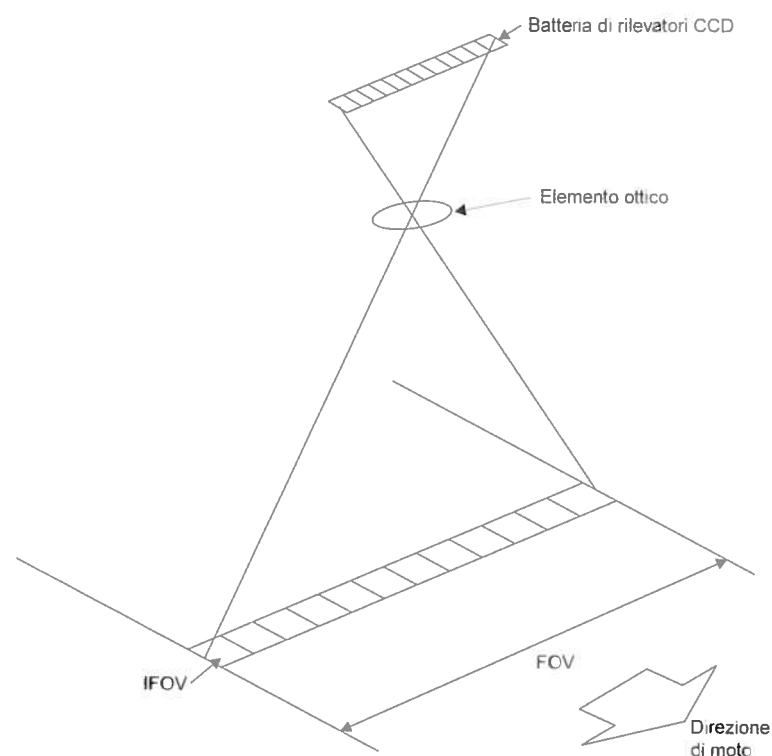


Figura 2.8. Schema di funzionamento dello scanner push-broom

sequenza e da un elemento ottico attraverso il quale la radiazione passa prima di colpire i rilevatori. Dato che la scansione della superficie terrestre avviene in questo caso linea dopo linea, la ripresa elementare per questo sensore risulta un'intera linea registrata dalla barretta di rilevatori. Il sensore è generalmente orientato trasversalmente alla direzione di volo (figura 2.8). I satelliti ad alta risoluzione di ultima generazione utilizzano il sistema *push-broom*, che sta progressivamente sostituendo il sistema *whisk-broom*.

## 2.5. La risoluzione degli strumenti

I sensori per il telerilevamento possono essere caratterizzati attraverso una loro proprietà fondamentale, definita come *risoluzione*, distinta in quattro tipologie diverse e più precise:

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

### 2.5.1. Risoluzione geometrica

La *risoluzione geometrica* o *spaziale* è data dalle dimensioni al suolo dell'area elementare di cui viene rilevata la radiazione elettromagnetica riflessa, definita anche *campo di vista istantaneo*, per il quale si usa l'acronimo IFOV (dall'inglese *Instantaneous Field Of View*). Ogni area elementare, in un'immagine generata da un sensore, viene rappresentata da una cella o pixel, all'interno della quale il valore della radiazione rilevata è unico. La matrice di pixel costituisce l'immagine stessa. Il campo di vista complessivo in senso ortogonale alla direzione di movimento del sensore è invece abbreviato con FOV (*Field Of View*). Si vedano a proposito le figure 2.7 e 2.8.

Più cresce la dimensione in metri terreno dei pixel di un'immagine, più diminuisce la risoluzione spaziale, poiché diminuisce la capacità di discriminazione degli oggetti. Viceversa, più diminuisce la dimensione del pixel, più cresce la risoluzione, poiché saranno sempre più piccoli gli elementi riconoscibili.

La dimensione a terra dei pixel è funzione delle caratteristiche strumentali e in particolare del cono angolare di visibilità del sensore, mentre è indipendente dalla quota di volo. In generale, nel panorama dei sensori per il telerilevamento attualmente disponibili, la risoluzione spaziale varia da poco meno di mezzo metro a vari chilometri. La figura 2.9 mostra la dimensione dei pixel di alcuni dei più comuni sensori



Figura 2.9. Confronto fra celle a risoluzione diversa e il tessuto urbano



Figura 2.10. Confronto fra tre immagini di una stessa zona ripresa a risoluzione spaziale diversa

rispetto alla tessitura di un centro urbano. Più alta è la risoluzione geometrica, più fedele alla realtà sarà la rappresentazione data dall'immagine della superficie della Terra (figura 2.10). Al di sotto della dimensione del pixel, non è possibile discernere oggetti diversi, ma va detto anche che, per riconoscere un determinato elemento, è necessario che esso sia di dimensioni ben più grandi di un singolo pixel.

Al fine di utilizzare un linguaggio comune nella descrizione della risoluzione geometrica, nella tabella 2.1 vengono date le definizioni di risoluzione associate a intervalli di dimensione del pixel.

Risoluzione spaziale (m)	Definizione
0,1-0,5	Altissima
0,5-1	Molto alta
1-4	Alta
4-12	Media
12-50	Medio bassa
50-250	Bassa
250-1000	Molto bassa
> 1000	Bassissima

Tabella 2.1. Definizione delle risoluzioni associate agli intervalli di dimensione del pixel

### 2.5.2. Risoluzione spettrale

La risoluzione spettrale definisce l'intervallo di lunghezza d'onda  $\lambda$  a cui è sensibile lo strumento. Ciascun intervallo di lunghezze d'onda viene definito come banda o canale spettrale e un sensore può essere sensibile alla radiazione in più intervalli di  $\lambda$  ovvero in più bande.

Un sensore ad alta risoluzione spettrale sarà quindi caratterizzato da un alto numero di bande spettrali, ciascuna delle quali sarà definita da un intervallo di lunghezze d'onda molto "stretto". La larghezza delle bande influisce infatti sulla capacità del sensore di discriminare differenti tipi di oggetti, aventi firme spettrali diverse. Un sensore capace di registrare la radiazione EM in numerosi intervalli spettrali è detto *multispettrale*. Generalmente questo tipo di sensori ha un numero

variabile fra quattro e quattordici canali. Quando il numero di bande raggiunge le centinaia, con ampiezze medie di ciascun canale inferiori ad  $1 \mu\text{m}$ , allora si parla di sensore *iperspettrale*; in tal caso le capacità discriminatorie sono molto maggiori e gli oggetti separabili in base alla loro risposta spettrale saranno molti di più. Tipicamente infatti mentre i sensori multispettrali vengono usati per i più disparati scopi del telerilevamento, gli iperspettrali, meno diffusi, trovano il loro utilizzo in campi molto specifici come ad esempio la ricerca mineraria o l'identificazione di strutture in amianto.

### 2.5.3. Risoluzione radiometrica

La risoluzione radiometrica è rappresentata dalla minima energia necessaria per stimolare il sensore affinché esso generi un segnale elettrico codificabile in un DN. Maggiore è la risoluzione radiometrica, maggiore sarà la capacità del sensore di registrare piccole differenze di energia.

Nel convertire il segnale elettrico analogico in digitale, viene usato un sistema di codifica binario, dove il numero di DN usati per rappresentare la gamma è dato da  $2^Q$ , dove  $Q$  è il numero di bit usato per la codifica. Ad esempio, in molti sistemi di telerilevamento, vengono usati 8 o 16 bit per la codifica, i quali determinano rispettivamente  $2^8 = 256$  DN e  $2^{16} = 65.536$  DN.

Ne segue che più alto è  $Q$ , più sono numerosi i DN, più alta sarà la risoluzione radiometrica; pertanto l'immagine digitale si avvicinerà maggiormente alla rappresentazione della realtà, poiché avrà a disposizione un numero di valori maggiore per codificare l'energia registrata. Questa proprietà è piuttosto evidente nel confronto fra le immagini della figura 2.11.

Ciascun DN dell'intervallo definito dalla codifica binaria, per scopi rappresentativi, viene associato a un colore di una scala cromatica. Questa scala è normalmente costituita da livelli o toni di grigio, con i due estremi corrispondenti al nero e al bianco. Per analogia alle fotografie in B/N, il colore nero è associato ai minimi valori di radianza registrati dal sensore, mentre il bianco ai massimi. Nel mezzo, la gamma dei grigi è associata ai valori di radianza intermedi.

In un'immagine digitale, ciascun pixel o cella porta un singolo valore di DN che

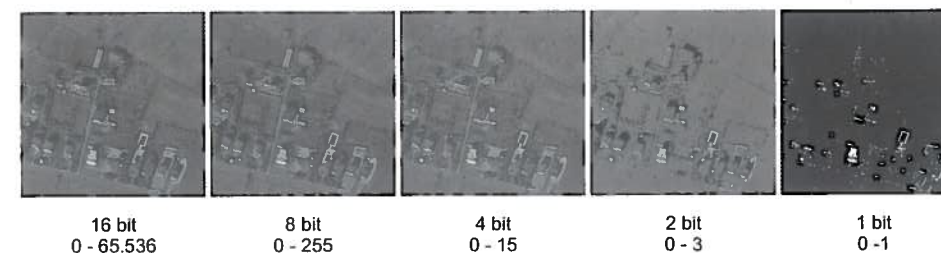


Figura 2.11. Confronto fra tre immagini di una stessa zona con differente risoluzione radiometrica



rappresenta la media dell'energia riflessa e/o emessa dalla porzione di superficie terrestre compresa in quel pixel. Ma di questo si parlerà più dettagliatamente nel capitolo 3.

#### 2.5.4. Risoluzione temporale

La risoluzione temporale rappresenta la capacità di un sensore di riprendere immagini di una stessa porzione di superficie terrestre con cadenza regolare e dipende dalla programmazione dell'orbita della piattaforma. Il periodo di tempo che intercorre tra due riprese successive della stessa area viene definito *tempo di rivisitazione*. Un'alta risoluzione temporale indica un tempo di rivisitazione basso, quindi una maggiore frequenza di immagini sulla stessa area. L'effetto opposto si ha con una bassa risoluzione temporale.

Attraverso le orbite quasi-polari eliosincrone e in virtù del moto rotatorio della Terra, i satelliti, ogni volta che compiono un'orbita, non tornano sulla stessa verticale della superficie terrestre, ma osservano una zona spostata verso ovest. La rivisitazione della stessa area non avviene pertanto se non dopo un certo numero di orbite, che dipende sia dalle caratteristiche intrinseche della piattaforma sia dall'ampiezza della striscia di terreno ripresa (ossia il FOV). Tuttavia, alcuni strumenti di ripresa di ultima generazione sono anche in grado di orientare il proprio campo di visuale e quindi riprendere in un dato passaggio la zona acquisita al passaggio precedente, abbassando notevolmente il tempo di rivisitazione e quindi aumentando la risoluzione temporale. Questo tipo di ripresa è di solito effettuato solo su commissione e comporta aumenti del costo delle immagini.

### 2.6. Panoramica dei principali sensori per telerilevamento

#### 2.6.1. Cenni introduttivi

La maggior parte dei sensori preposti all'acquisizione di immagini telerilevate disponibili per uso civile è stata ed è tuttora montata su piattaforme satellitari. Solo una parte marginale è aerotrasportata e raramente viene utilizzata per scopi commerciali. Per questo motivo, si approfondirà principalmente l'argomento dei sensori satellitari, dedicando solo qualche cenno a quelli aerotrasportati.

La nascita del telerilevamento moderno si fa coincidere con la messa in orbita, il 23 luglio 1972, del primo satellite artificiale per l'osservazione della Terra: il Landsat 1, altrimenti detto ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*). Da quel momento in poi, il numero di satelliti con a bordo sensori per telerilevamento terrestre messi in orbita è aumentato vertiginosamente e, dopo gli Stati Uniti, numerose altre nazioni hanno realizzato e messo in funzione i loro strumenti, fra cui la Francia e altri paesi europei consorziati nell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), la Russia, l'India, Israele e il Giappone.

Dal 1972, i sensori per il telerilevamento hanno visto un'enorme evoluzione soprattutto sotto il piano della risoluzione spaziale e spettrale, ma anche di quella radiometrica. Il primo Landsat montava il sensore MSS (*Multi Spectral Scanner*) che generava immagini con risoluzione a terra di 80 m e possedeva 4 bande spettrali. Le immagini erano campionate a 6 bit (64 livelli di grigio). L'ultimo nato della generazione Landsat, l'ETM+, sebbene ad oggi non più funzionante, ha una risoluzione spaziale di 15 m (nella banda pancromatica), ben 8 bande spettrali e immagini campionate a 8 bit. Esistono tuttavia sensori attualmente disponibili che hanno un pixel di 0,50 m al suolo e campionamento a 16 bit, mentre altri (sempre nell'ambito dei sensori commerciali) hanno fino a 7 bande solo nell'infrarosso medio.

La tendenza è quindi evidente: andare progressivamente verso un potenziamento delle risoluzioni, specialmente la geometrica, la spettrale e la radiometrica. Tutto questo è sicuramente auspicabile, ma è necessario che vada di pari passo con un'evoluzione dei sistemi informatici che devono poi gestire le immagini; infatti a maggiore risoluzione spaziale corrispondono immagini con più pixel; risoluzione radiometrica più alta significa che ciascun pixel occupa più memoria e, infine, risoluzione spettrale maggiore significa che l'informazione telerilevata è moltiplicata per un numero maggiore di bande. Il risultato è la necessità di computer sempre più potenti, con hard disk o altri supporti di memorizzazione sempre più capienti per contenere tutta questa mole di dati.

#### 2.6.2. Le bande spettrali

Prima di illustrare le caratteristiche di ciascun sensore è opportuno soffermarsi sul concetto di banda spettrale e sulle proprietà di ciascun intervallo spettrale in relazione all'osservazione della Terra. Per questo si darà una breve descrizione degli ambiti applicativi delle più comuni finestre spettrali osservate dai sensori:

- 0,50-0,75  $\mu\text{m}$  (pancromatico-pan): questa banda ha una limitata definizione spettrale, essendo molto larga (0,25  $\mu\text{m}$ ), ma riesce a raggiungere risoluzioni spaziali fino a 4 volte maggiori rispetto alle bande multi spettrali; per questo è utilizzata per la fotointerpretazione degli elementi del territorio; normalmente la banda pancromatica viene utilizzata da sola, rappresentata in toni di grigio, oppure può essere combinata con bande multispettrali attraverso una procedura definita di *fusione dati* o anche *pan-sharpening*, a cui si accennerà nel paragrafo 3.4.5;
- 0,45-0,52  $\mu\text{m}$  (blu-verde): questo intervallo spettrale è usato per lo studio della trasparenza dell'acqua, grazie alla capacità della radiazione in queste lunghezze d'onda di penetrare seppur limitatamente nei corpi idrici; in questa banda si risente purtroppo dei maggiori effetti di disturbo atmosferici;
- 0,52-0,60  $\mu\text{m}$  (verde): banda utilizzata per osservare il picco di riflettanza della vegetazione nel visibile e valutarne il vigore;



- 0,63-0,69  $\mu\text{m}$  (rosso): banda di grande importanza per diversificare la vegetazione, grazie ai differenti valori di assorbimento della clorofilla nelle varie specie; la diversificazione si fa solitamente mettendo a confronto questa banda con quella posizionata nell'infrarosso vicino, attraverso indici di vegetazione (vedere paragrafo 3.4.3); fra le bande nel visibile è quella che risente meno dell'effetto atmosferico; per questo gli elementi della superficie terrestre appaiono più nitidi rispetto alle due precedenti;
- 0,76-0,90  $\mu\text{m}$  (infrarosso vicino): grazie al picco massimo di riflettanza della vegetazione in questa regione dello spettro, questa banda viene usata per gli studi sulla biomassa e sulla quantità d'acqua delle piante;
- 1,55-1,75  $\mu\text{m}$  (infrarosso vicino): in questa regione la riflettanza della vegetazione è fortemente dipendente dalla sua umidità; la banda risulta quindi molto utile per rilevare lo stress idrico delle piante, ma anche per discriminare i suoli in relazione al contenuto d'acqua; in questa regione è infine possibile separare le nuvole dalla neve, cosa difficile nelle bande del visibile e dell'infrarosso vicino, in quanto le prime riflettono la radiazione mentre la seconda la assorbe;
- 2,08-2,35  $\mu\text{m}$  (infrarosso vicino): banda molto potente nella discriminazione fra rocce diverse (dove siano affioranti), specialmente se sottoposte a diversa alterazione idrotermale;
- 10,4-12,5  $\mu\text{m}$  (infrarosso lontano o termico): intervallo spettrale in cui viene registrata la radiazione emessa dalla superficie terrestre. Questa radiazione è legata alla temperatura assoluta della superficie, per cui è possibile ottenere immagini termiche.

### 2.6.3. I sensori

Nelle prossime pagine si illustreranno le caratteristiche di un certo numero di sensori montati su piattaforme satellitari che attualmente forniscono immagini telerilevate. La lista non è esauriente, in quanto l'interesse è focalizzato su quei sensori che forniscono immagini utili per studi di dettaglio e per la fotointerpretazione. Si sono pertanto trascurati i satelliti meteorologici o altri destinati ad analisi a livello globale.

Le immagini prodotte dai sensori sono distribuite sia da compagnie o enti che hanno messo in orbita lo strumento sia da società localizzate nei vari paesi che possiedono stazioni di ricezione dei dati provenienti dal satellite o che acquisiscono da queste le immagini e le ridistribuiscono. In generale, quasi tutte le immagini satellitari sono a pagamento. Solo nel caso del Landsat e di qualche altro sensore, sono state rese disponibili gratuitamente immagini di archivio presso il sito del *Global Land Cover Facility* (GLCF – [www.landcover.org](http://www.landcover.org)).

Nel prosieguo del paragrafo, oltre a fornire una schematica descrizione delle caratteristiche principali dei vari sensori, si indicheranno anche i riferimenti sul

web dei distributori. Non sarà invece indicato il prezzo, in quanto variabile, per il quale si suggerisce di consultare i siti delle compagnie che si occupano della vendita di immagini sul territorio italiano. Ulteriori dettagli possono essere reperiti anche dalla bibliografia o su Internet agli indirizzi segnalati.

Di ogni sensore si forniranno informazioni sulle risoluzioni:

- spaziale, indicando la dimensione al suolo del pixel in metri;
- spettrale, indicando il numero di bande e gli intervalli spettrali di ciascuna di esse;
- radiometrica, attraverso il numero di bit a cui sono campionate le immagini;
- temporale, fornendo il tempo di rivisitazione.

Si daranno inoltre informazioni sul campo di vista di ciascuno strumento, che prende il nome di *swath* e che definisce la larghezza in km delle immagini generate. Di solito l'immagine ripresa dal sensore, avente le dimensioni pari allo *swath*, prende il nome di *scena*. È comune che i distributori di dati satellitari mettano in vendita anche ritagli di scene (di solito sottomultipli, tipo un quarto), che prendono il nome di *sub-scene*.

#### 2.6.3.1. La famiglia dei satelliti Landsat

Il primo satellite che si andrà a descrivere è il Landsat, prodotto dalla NASA e, a ragione, definibile come il padre di tutti i satelliti per il telerilevamento. Tralasciando il sensore MSS, non più attivo e ormai obsoleto, sono due i sensori tuttora disponibili: il *Thematic Mapper* (TM) montato sul Landsat 5 e l'*Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), montato sul Landsat 7. Al momento tuttavia il Landsat 7 è fuori uso da ormai sette anni, per cui sono disponibili solo immagini d'archivio del periodo compreso tra il 1999, data della sua messa in orbita, e il 2003 in cui ha smesso di trasmettere. Attualmente l'unico Landsat funzionante è il 5, con il "vecchio" sensore TM. Qualora anche questo satellite cessasse di funzionare, non è prevista la continuazione della missione con nuovi strumenti.

#### LANDSAT 5 (NASA-USA) – SENSORE TM

##### Specifiche tecniche:

- data di lancio: 1 marzo 1984;
- operatività: attualmente in funzione; riprese sospese fra novembre 2005 e gennaio 2006;
- quota di volo: 705 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena (*swath*): 185 km;
- risoluzione radiometrica: 8 bit;
- risoluzione temporale: 16 giorni;
- modalità di ripresa: in continuo.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
1. Visibile, blu	0,45-0,52	30
2. Visibile, verde	0,52-0,60	
3. Visibile, rosso	0,63-0,69	
4. Infrarosso vicino	0,76-0,90	
5. Infrarosso vicino	1,55-1,75	
7. Infrarosso vicino	2,08-2,35	120
6. Infrarosso termico	10,4-12,5	

Tabella 2.2. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [www.e-geos.it](http://www.e-geos.it);
- [landsat.gsfc.nasa.gov](http://landsat.gsfc.nasa.gov);
- [landsat.usgs.gov](http://landsat.usgs.gov);
- [landcover.org](http://landcover.org).

## LANDSAT 7 (NASA-USA) — SENSORE ETM+

*Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 15 aprile 1999;
- operatività: fuori uso dal maggio 2003;
- quota di volo: 705 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 185 km;
- risoluzione radiometrica: 8 bit;
- risoluzione temporale: 16 giorni;
- modalità di acquisizione: in continuo.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
1. Visibile, blu	0,45-0,52	30
2. Visibile, verde	0,52-0,60	
3. Visibile, rosso	0,63-0,69	
4. Infrarosso vicino	0,76-0,90	
5. Infrarosso vicino	1,55-1,75	
7. Infrarosso vicino	2,08-2,35	60
6. Infrarosso termico	10,4-12,5	
8. Pancromatico	0,50-0,90	15

Tabella 2.3. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- si veda Landsat 5.

## 2.6.3.2. I satelliti francesi Spot

Fin dalla fine degli anni '80 l'Agenzia spaziale francese (CNES: *Centre National*

*d'Etudes Spatiales*) ha intrapreso il programma SPOT, finalizzato alla messa in orbita di satelliti per l'osservazione della Terra. SPOT 1 è stato messo in orbita nel 1986; nel 1990 e 1993 hanno fatto seguito SPOT 2 e 3, con caratteristiche analoghe ai precedenti.

All'interno del Programma europeo per il controllo globale della vegetazione (*Vegetation Programme*), sono stati sviluppati i due nuovi satelliti SPOT 4 e 5, lanciati in orbita nel 1998 e nel 2002, che integrano e migliorano le caratteristiche dei precedenti.

## SPOT 4 (CNES-FRANCIA) — SENSORE HRVIR

*Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 24 marzo 1998;
- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 832 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 60 km in ripresa verticale (il sensore è progettato per riprendere anche con angolazione fino a  $\pm 27^\circ$ , per realizzare ripetitività a breve termine e stereoscopia, per cui l'ampiezza varia fino a 80 km);
- risoluzione radiometrica: 8 bit;
- risoluzione temporale: 26 giorni nominali, anche se le riprese vengono effettuate in gran parte su programmazione; non esiste quindi una copertura continua della superficie terrestre;
- modalità di acquisizione: su richiesta.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
1. Visibile, verde	0,50-0,59	20
2. Visibile, rosso	0,61-0,68	
3. Infrarosso vicino 1	0,78-0,89	
4. Infrarosso vicino 2	1,58-1,75	
5. Monocromatica	0,61-0,68	10

Tabella 2.4. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [www.spotimage.fr](http://www.spotimage.fr).

## SPOT 5 (CNES-FRANCIA) — SENSORE HRG

*Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 3 maggio 2002;
- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 832 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;

- ampiezza della scena: 60 km in ripresa verticale (il sensore è progettato per riprendere anche con angolazione fino a  $\pm 27^\circ$ , per realizzare ripetitività a breve termine e stereoscopia, per cui l'ampiezza varia fino a 80 km);
- risoluzione radiometrica: 8 bit;
- risoluzione temporale: 26 giorni nominali. Vale quanto detto per lo SPOT 4 sulle riprese programmate;
- modalità di acquisizione: su richiesta.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
1. Visibile, verde	0,50-0,59	10
2. Visibile, rosso	0,61-0,68	
3. Infrarosso vicino	0,78-0,89	
4. Infrarosso vicino	1,58-1,75	20
5. Pancromatica	0,48-0,71	5 e 2,5

Tabella 2.5. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- si veda SPOT 4.

**2.6.3.3. I satelliti indiani**

Facendo seguito ai lanci dimostrativi dei due satelliti della serie *Bhaskara* fra la fine degli anni '70 e l'inizio degli anni '80, l'India ha iniziato a sviluppare il proprio programma di messa in orbita di satelliti per l'osservazione della Terra IRS (*Indian Remote Sensing*), culminato con il lancio del primo strumento operativo IRS 1A nel 1988. A questo sono seguiti altri 14 satelliti di cui l'ultimo è entrato in funzione alla fine del 2009. Se si considera che solo uno, l'IRS P1, è andato distrutto durante il lancio, i satelliti indiani, ad oggi, rappresentano la più numerosa costellazione per l'osservazione della Terra.

**IRS 1C/1D (ISRO-INDIA) — SENSORI PAN E LISS 3***Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 28 dicembre 1995 (IRS 1C) e 20 settembre 1997 (IRS 1D);
- operatività: solo l'IRS 1D è attualmente in funzione;
- quota di volo: 817 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 63-70 km (Pan), 127-141 km (LISS);
- risoluzione radiometrica: 6 bit;
- risoluzione temporale: 24 giorni;
- modalità di acquisizione: in continuo.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
1 (Pan) — Pancromatica	0,50-0,75	5,8
2 (LISS 3) — Visibile, verde	0,52-0,59	23
3 (LISS 3) — Visibile, rosso	0,62-0,68	
4 (LISS 3) — Infrarosso vicino	0,77-0,86	
5 (LISS 3) — Infrarosso vicino	1,55-1,70	69

Tabella 2.6. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [www.isro.org](http://www.isro.org);
- [www.e-geos.it](http://www.e-geos.it).

**IRS P6/RESOURCESAT-1 (ISRO-INDIA) — SENSORI LISS 3 E LISS 4***Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 17 ottobre 2003;
- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 817 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 70,3 km (LISS 4), 141 km (LISS 3);
- risoluzione radiometrica: 7 bit;
- risoluzione temporale: 24 giorni;
- modalità di acquisizione: in continuo.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
1. Visibile, verde	0,52-0,59	24
2. Visibile, rosso	0,62-0,68	
3. Infrarosso vicino	0,77-0,86	
4. Infrarosso medio	1,55-1,70	

Tabella 2.7a. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica liss 3

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
2. Visibile, verde	0,52-0,59	6
3. Visibile, rosso	0,62-0,68	6
4. Infrarosso vicino	0,77-0,86	6

Tabella 2.7b. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica liss 4

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- si veda IRS 1C/1D.

**CARTOSAT 1 (ISRO-INDIA)***Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 5 maggio 2005;



In particolare, di questi tre coefficienti, assume particolare importanza la riflettività, poiché i sensori di telerilevamento per l'osservazione della Terra rilevano principalmente la radiazione riflessa dalla superficie di quest'ultima. Quando viene considerata in funzione della lunghezza d'onda,  $\rho_{(\lambda)}$  viene definita *riflettività spettrale* ( $\rho_{(\lambda)} = \Phi_{r(\lambda)} / \Phi_{i(\lambda)}$ ) e, se espressa in percentuale, prende il nome di *riflettanza spettrale*. L'andamento spettrale della riflettività varia a seconda del tipo di superficie su cui incide la radiazione EM e anzi caratterizza in maniera distintiva il tipo di superficie. Per questo motivo esso viene anche chiamato *firma spettrale*. Il prossimo paragrafo tratterà in maggior dettaglio proprio questo argomento.

### 1.8. Le firme spettrali

La percentuale del flusso di energia radiante incidente su un corpo che viene riflessa, per una data lunghezza d'onda, definita nel paragrafo precedente *riflettanza spettrale*, è funzione delle caratteristiche geometriche, della natura e della composizione del corpo stesso. Ad esempio, il contenuto d'acqua di un suolo o il contenuto di clorofilla della vegetazione sono fattori che influiscono fortemente sulla riflettanza. L'acqua infatti tende in generale ad abbassare la riflettanza di tutti quei corpi che la contengono, mentre la presenza di clorofilla determina un assorbimento della radiazione nell'intervallo spettrale del rosso e una forte riflessione in quello dell'infrarosso vicino.

In sostanza, è possibile analizzare il valore della riflettanza spettrale di un corpo in relazione alle varie lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico. Questa analisi porta a realizzare una curva in uno spazio bidimensionale, dove sull'asse delle ordinate è rappresentata la riflettanza e su quello delle ascisse la lunghezza d'onda.

Una curva così costruita è detta *firma spettrale* in quanto caratteristica distintiva, come la firma di una persona, della risposta di un particolare corpo alla radiazione incidente lungo tutto lo spettro elettromagnetico. La figura 1.6 mostra alcune tipiche firme spettrali di oggetti come la vegetazione, l'acqua e il suolo. È possibile tracciare virtualmente la firma spettrale di qualunque materiale: rocce, minerali, diversi tipi di vegetazione in diversi stati evolutivi o di salute, ecc.

La firma spettrale dei diversi tipi di elementi osservabili sulla superficie terrestre costituisce un utile strumento per sapere quali finestre o bande spettrali scegliere per riconoscerli nelle immagini e per differenziarli da altri elementi. Considerando ancora la figura 1.6, si può notare che la vegetazione (qui rappresentata da boschi di conifere e latifoglie) assume valori particolarmente alti nella zona spettrale corrispondente a circa  $0,8 \mu\text{m}$ , corrispondente all'infrarosso vicino; infatti, è proprio in questa regione che le piante, in virtù del processo di fotosintesi clorofilliana, hanno la loro massima riflettanza. Un altro picco di riflettanza un po' più basso dovuto a tale attività è nel visibile, nella regione del verde (circa

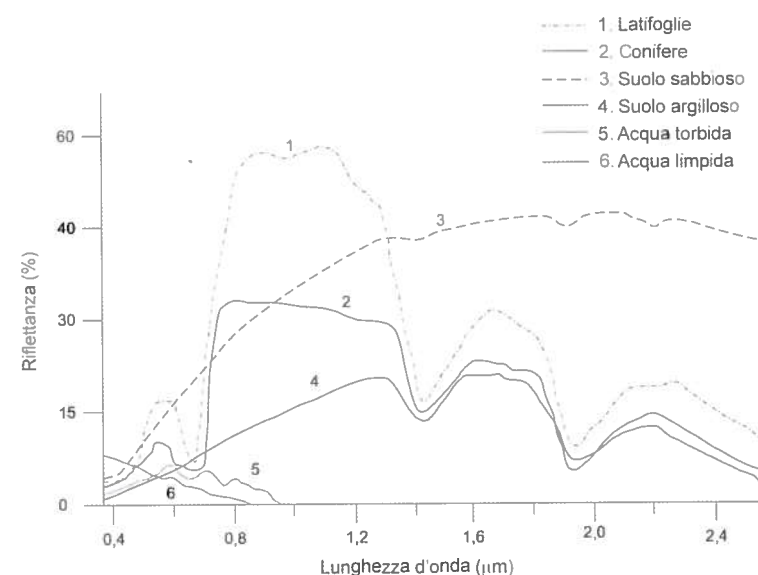


Figura 1.6. Firme spettrali di alcune tipiche superfici

$0,55 \mu\text{m}$ ) ed è per questo che l'uomo percepisce la vegetazione di colore verde, non essendo capace di "vedere" nell'infrarosso. Il suolo, invece, tende ad avere i valori massimi intorno a  $1,7 \mu\text{m}$ , nella regione dell'infrarosso medio. L'acqua ha massima riflettanza nel visibile nella regione del blu e poi va a scendere fino ad avere valori di  $\rho$  pari a zero quando si entra nell'infrarosso vicino. Per questo motivo, se si osserva uno specchio d'acqua (specialmente se profondo) nell'infrarosso, lo si vede nero.

Prendendo in considerazione le relazioni reciproche fra le varie superfici, se si volesse discriminare la vegetazione dal suolo nudo, si dovrebbe identificare la regione spettrale dove la differenza di riflettanza fra i due elementi è massima. Questa regione, dall'analisi della figura 1.6, risulta essere quella intorno a  $0,8$  micrometri, proprio dove la vegetazione ha il suo massimo. In questa regione sarebbe invece più difficile discriminare la neve dalla vegetazione, in quanto la prima ha una riflettanza altissima in tutto il visibile e nell'infrarosso vicino, per poi calare bruscamente intorno a  $1,4 \mu\text{m}$ . Una qualunque banda spettrale nel visibile o nell'infrarosso vicino ci permetterebbe quindi di separare meglio le due diverse superfici.

Più difficile può risultare la separazione fra tipi diversi di suolo o di vegetazione. In entrambi i casi si tratta di identificare la regione spettrale dove la differenza di riflettanza fra gli elementi a confronto è massima. Un caso tipico è quello della separazione fra boschi di conifere e boschi di latifoglie. L'andamento delle due curve nel visibile è molto vicino, rendendo la discriminazione alquanto difficile. Appena si entra nell'infrarosso vicino, le curve si separano piuttosto nettamente:

le conifere restano su valori di riflettanza bassi (30%), mentre le latifoglie salgono al 50% e oltre. Questa differenza è dovuta proprio alle caratteristiche intrinseche delle foglie dei due tipi di albero. Una conifera è dotata di foglie aghiformi dalla superficie molto ridotta, mentre le latifoglie, come dice il nome stesso, hanno foglie dalla superficie ampia. La radiazione incidente sulla superficie fogliare sarà maggiormente riflessa se l'area della foglia è più ampia: ne consegue che le latifoglie tendono a riflettere la radiazione più delle conifere. In un'immagine telerilevata in cui la riflettanza è rappresentata con una scala di grigio, dal nero (minima riflettanza) al bianco (massima riflettanza), nella regione dell'infrarosso vicino i boschi di latifoglie appariranno più chiari e quelli di conifere più scuri. Un'altra caratteristica importante della vegetazione è il suo contenuto d'acqua, che rappresenta, tra l'altro, un indice di salute delle piante. Lungo lo spettro elettromagnetico, a lunghezze d'onda pari a 1,4, 1,9 e 2,7  $\mu\text{m}$ , la presenza d'acqua determina un forte assorbimento della radiazione. Qualunque oggetto la contenga tenderà quindi ad avere una bassa riflettanza in questa regione spettrale. Di contro, l'assenza d'acqua determinerà un'alta riflettanza. In base a ciò, osservando la vegetazione in queste bande spettrali, sarà possibile avere un'idea del suo stato di stress idrico, ottenendo utili indicazioni nelle applicazioni forestali e agronomiche del telerilevamento.

Sempre a proposito di acqua, si è osservato che, entrando nella regione dell'infrarosso vicino, la riflettanza dell'acqua tende praticamente a zero: ciò risulta vero per acqua limpida e profonda. Esistono tuttavia due casi in cui, in questa regione spettrale, l'acqua non risulta nera (riflettanza uguale a zero): fondale basso e presenza di sedimenti in sospensione. Se l'acqua è poco profonda, la radiazione nell'infrarosso, grazie al suo ridotto potere penetrativo, riesce ad andare a colpire il materiale che compone il fondale, venendo poi parzialmente riflessa. Se l'acqua contiene particelle in sospensione (tipicamente materiale sedimentario come sabbie e limi), quindi è torbida, saranno loro stesse a riflettere la radiazione infrarossa. Se l'acqua in una immagine ripresa nell'infrarosso vicino non risulta nera, è pertanto possibile che si tratti di uno di questi due casi. Comunemente, l'acqua non risulta nera lungo le coste basse o in laghi poco profondi oppure, per il secondo motivo, alla foce dei fiumi o lungo il corso degli stessi.

Alla luce di tali riflessioni appare chiaro che capire e conoscere le firme spettrali è un passaggio fondamentale nel telerilevamento e nella fotointerpretazione. Solo una volta compreso come i differenti elementi presenti sulla superficie terrestre, quali rocce, suoli, vegetazione, corpi idrici, ecc., interagiscono con la radiazione elettromagnetica, si è in grado di leggere e interpretare correttamente le immagini prodotte dai sensori.

## 2. SISTEMI DI RIPRESA

### 2.1. Cenni introduttivi

L'osservazione della Terra può essere effettuata mediante strumenti chiamati *sensori*, di cui esistono varie tipologie, montati su diversi supporti, chiamati *piattaforme*. In senso lato, si può considerare come il primo e più naturale dei sensori l'occhio e il corpo umano come la sua piattaforma. Dal punto di vista dell'uomo, il sensore occhio osserva la superficie terrestre nella finestra spettrale del visibile, registrando immagini nel cervello. Tali registrazioni tuttavia non sono permanenti e tendono a deteriorarsi nel tempo e con l'avanzare dell'età.

Fra i sensori non naturali costruiti dall'uomo vi sono le camere fotografiche tradizionali che registrano su pellicole a emulsione e i sensori digitali. Questi ultimi, sia nel telerilevamento sia nella vita di tutti i giorni, si stanno affermando su larga scala, se si considera che sono impiegati sulle ormai diffusissime fotocamere digitali. Un sensore può essere montato su differenti tipi di piattaforma:

- al suolo, tipicamente su di un braccio sollevabile montato su un veicolo;
- aerea, su aeroplani o palloni aerostatici;
- satellitare, se il veicolo è in orbita attorno alla Terra.

I vari tipi di sensore, accoppiati a una determinata piattaforma, danno come prodotto delle loro registrazioni un'immagine le cui caratteristiche, diverse a seconda del sensore e della piattaforma, saranno illustrate nel prossimo capitolo. In generale, si può dire che al momento il tipo di immagine più utilizzata nel telerilevamento è l'immagine digitale, costituita da una matrice di celle dette *pixel*, ciascuna delle quali porta con sé l'informazione relativa all'energia riflessa dalla superficie terrestre.

In questo capitolo verranno trattati in generale i vari tipi di sensore e di piattaforma, illustrandone caratteristiche e funzionamento. Si passeranno poi in rassegna i vari tipi di sensore disponibili sul mercato per le applicazioni del telerilevamento.

### 2.2. Sensori attivi e passivi

Nel telerilevamento per l'osservazione della Terra sono utilizzati due diversi tipi



di sensore: quello cosiddetto *passivo* e quello *attivo*.

I sensori passivi registrano la radiazione elettromagnetica proveniente da un oggetto, sia essa riflessa o emessa, ma comunque naturalmente disponibile. È evidente che la principale sorgente di energia elettromagnetica è il Sole e la radiazione che la maggior parte dei sensori per il telerilevamento capta è quella solare riflessa dalla superficie terrestre (figura 2.1). Per questo motivo, tali sensori hanno bisogno del Sole per poter registrare l'energia proveniente dalla Terra e questo significa che il loro funzionamento è limitato alle ore diurne. Inoltre, misurando unicamente energia riflessa, in caso di copertura nuvolosa il sensore capterà la radiazione solare riflessa dalle nuvole, rendendo impossibile l'osservazione della superficie terrestre sottostante. In ogni caso, i sensori ottici passivi sono i più diffusi per l'osservazione della Terra, anche perché, operando nel campo della radiazione visibile e dell'infrarosso, forniscono immagini che si avvicinano molto come aspetto alle foto aeree, facilitando così la loro interpretazione.

I sensori attivi generano essi stessi la radiazione da inviare verso la superficie terrestre, registrandone poi la componente riflessa attraverso un'antenna (figura 2.2). Grazie alla loro natura di sorgente energetica, questi sensori possono operare anche in assenza di radiazione solare. Inoltre, dato che le lunghezze d'onda del segnale emesso sono piuttosto grandi, trovandosi nella zona spettrale delle microonde, tali sensori possono osservare la superficie terrestre anche in presenza di nuvole. Le particelle di vapor acqueo, infatti, sono più piccole della lunghezza d'onda del segnale emesso e sono perciò da esso per così dire "scavalcate". Tipico sensore attivo è il *radar* (acronimo per *Radio Detection And Ranging*) di cui un particolare modello è il radar ad apertura sintetica (*SAR, Synthetic Aperture*

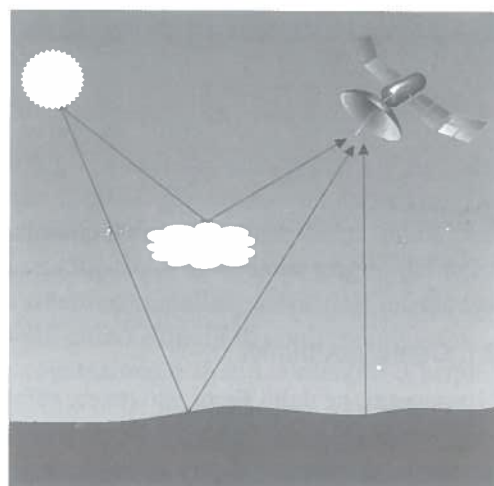


Figura 2.1. Funzionamento di un sensore passivo

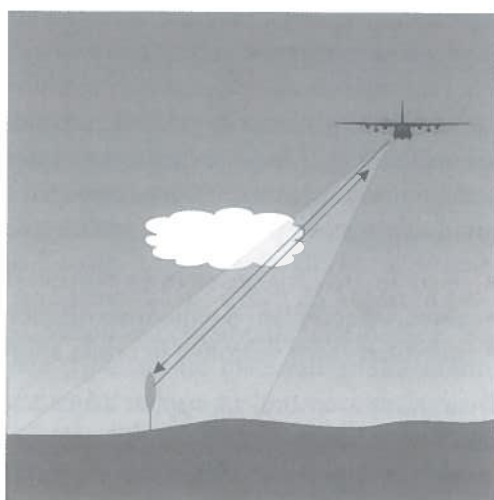


Figura 2.2. Funzionamento di un sensore attivo

*Radar*). Un altro è il *lidar* (o *Laser Imaging Detection And Ranging*), il quale però opera nel campo compreso fra l'ultravioletto e l'infrarosso vicino, emettendo impulsi o fasci laser verso terra e registrando la parte di radiazione riflessa. Data la loro maggiore diffusione, in questo testo saranno trattate esclusivamente le immagini dei sensori ottici di tipo passivo.

### 2.3. I tipi di piattaforma per il telerilevamento

Il telerilevamento fa uso di tre differenti piattaforme:

- satellitari;
- aeree;
- al suolo.

Ogni piattaforma costituisce un veicolo per uno o più sensori e non è raro che ne monti due, tre o più contemporaneamente. Il satellite europeo *Envisat*, per esempio, supporta addirittura nove diversi sensori.

#### 2.3.1. Piattaforme satellitari

Lo studio della superficie terrestre da distanze orbitali è quello che più tipicamente viene oggi effettuato nell'ambito del telerilevamento. Per questo le immagini generate da sensori montati su satelliti sono quelle che vengono più usate, grazie alle loro caratteristiche che le rendono convenienti rispetto ad altre immagini acquisite da piattaforme diverse. Una di queste è la frequenza di rivisitazione di uno stesso luogo sulla superficie terrestre, grazie alla notevole velocità di rivoluzione intorno al nostro pianeta, che permette di osservare l'evoluzione di determinati fenomeni relativamente rapidi, come ad esempio quelli legati al dissesto idrogeologico.

Le piattaforme satellitari possono essere strumenti automatici, messi in orbita attorno alla Terra da vettori o navicelle e/o stazioni spaziali con equipaggio umano a bordo. I più diffusi sono i satelliti automatici, che garantiscono un funzionamento pluriennale senza il continuo intervento umano. Le navicelle spaziali acquisiscono immagini della superficie terrestre esclusivamente nel corso delle loro missioni in orbita e non sistematicamente.

Le varie piattaforme orbitali si spostano a quote diverse dalla superficie terrestre (si veda figura 2.3): le navicelle tipo lo *Space Shuttle* orbitano a circa 200 km di altezza, mentre i satelliti si trovano a quote maggiori. In particolare, i satelliti per l'osservazione della Terra si trovano fra 450 e 900 km di altezza. Sopra a essi si possono trovare i satelliti della costellazione GPS a 20.000 km e i satelliti meteorologici geostazionari a 36.000 km.

I satelliti possono trovarsi su vari tipi di orbita (figura 2.4):



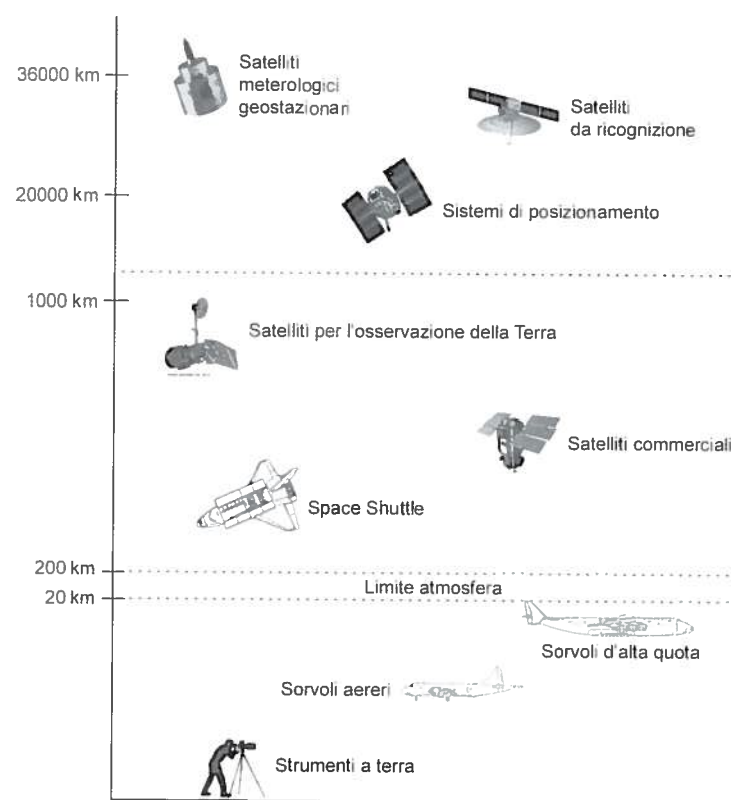


Figura 2.3. Quote operative dei vari tipi di sensore

- equatoriale;
- polare;
- quasi-polare.

L'orbita equatoriale (figura 2.4a) prevede che il piano orbitale coincida con il piano dell'equatore. Se la velocità del satellite è geosincrona, ovvero uguale alla velocità di rotazione della Terra, l'orbita sarà *geostazionaria*, perché il satellite si troverà sempre sulla medesima verticale. È questo il caso del più famoso fra i satelliti meteorologici, il *Meteosat*, attualmente arrivato alla seconda generazione, che sta costantemente sulla verticale del Golfo di Guinea e osserva sempre la stessa porzione di superficie terrestre.

In relazione alle orbite dei satelliti, si segnala un dato interessante da utilizzare in *Google Earth*: si tratta di un file .kmz che mostra la posizione in tempo reale di tutti i satelliti artificiali e altri manufatti orbitanti intorno alla Terra ([adn.agi.com/SatelliteDatabase/SatelliteDatabase.kmz](http://adn.agi.com/SatelliteDatabase/SatelliteDatabase.kmz)). Dopo averlo scaricato dall'indirizzo indicato, posto che si abbia *Google Earth* installato sul proprio PC ([earth.google.com](http://earth.google.com)), si può visualizzarlo facendo doppio clic sul file.

Un satellite la cui orbita sia polare (figura 2.4b) contiene nel proprio piano orbitale l'asse di rotazione della Terra. Tale satellite, a ogni successiva orbita, attraversa l'equatore in tempi differenti e quindi è in grado di vedere una medesima zona in diverse condizioni di illuminazione. Questa condizione non è però molto utile e per questo hanno molta più diffusione le orbite quasi-polari eliosincrone (figura 2.4c-d). In questa configurazione, il satellite ha il piano orbitale che forma un angolo qualunque con l'asse polare (anche se generalmente è un angolo piccolo) e, caratteristica molto importante, ha l'orbita sincronizzata con il Sole per cui, a

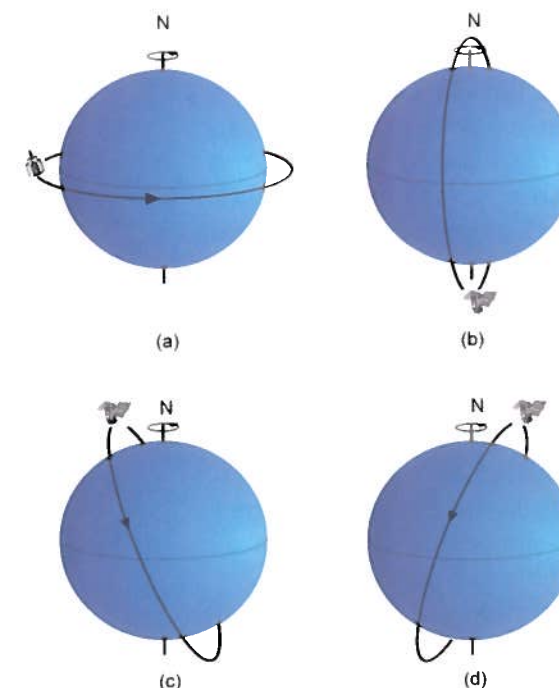


Figura 2.4. Varie tipologie di orbita dei satelliti per l'osservazione della Terra

ogni successivo passaggio, transita su un determinato punto della superficie terrestre sempre alla stessa ora e quindi con le stesse condizioni di illuminazione. I sensori che seguono questo tipo di orbita risultano strumenti ideali per l'osservazione della Terra, in quanto la possibilità di avere immagini di una stessa porzione di superficie terrestre sempre con le stesse condizioni di illuminazione le rende confrontabili fra loro e permette quindi di valutare l'evoluzione del territorio (tramite un'analisi cosiddetta *multitemporale*).

### 2.3.2. Piattaforme aeree

A una quota nettamente inferiore rispetto ai satelliti si trovano le piattaforme aeree costituite non soltanto da aeroplani, ma anche da elicotteri e palloni aerostatici. Questi ultimi, fra l'altro, rappresentano le più antiche piattaforme usate per il telerilevamento, quando James Wallace Black, il 13 ottobre del 1860, scattò le prime foto aeree da un pallone aerostatico frenato sopra la città di Boston a una quota di circa 365 m (figura 2.5).

La piattaforma aerea più utilizzata resta comunque l'aeroplano, che può volare a quote molto varie, da 300 a 6.000 m per osservazioni locali dettagliate, fino a 20.000 m per coprire aree più estese.

Le piattaforme aeree acquisiscono immagini sia analogiche che digitali. La frequenza con cui si rendono disponibili foto aeree di una certa zona è molto variabile: per i catasti agricoli, ogni anno vengono realizzate coperture fotografiche di tutta l'Italia; le regioni commissionano periodicamente voli di parte o dell'intero loro territorio; compagnie private realizzano ortofoto a livello nazionale all'incirca ogni cinque anni. La disponibilità di copertura fotografica sul territorio italiano è quindi piuttosto buona.

Per avere cadenze ancora più frequenti è tuttavia necessario commissionare espressamente un volo, per il quale i costi saranno sensibilmente maggiori rispetto ai prodotti di certi sensori satellitari. Il vantaggio delle piattaforme aeree è che, nel momento in cui si commissiona un volo, si possono scegliere tutti i parametri di data, ora, nonché quota di ripresa, ottenendo pertanto immagini aventi in generale una definizione maggiore rispetto ai sensori satellitari ad alta risoluzione.

### 2.3.3. Piattaforme al suolo

Tutti i sistemi di osservazione a distanza che siano in qualche modo vincolati alla superficie terrestre possono essere annoverati fra le piattaforme al suolo. Per esempio un veicolo che possieda un braccio estendibile in cima al quale sia posto lo strumento di rilevazione è una piattaforma al suolo (figura 2.6) ed è, fra l'altro, il caso più tipico. Le altezze massime che si possono ottenere con questi sistemi sono di circa 15 m e questo limita gli scopi per cui sono utilizzati. Di solito, infatti, le piattaforme al suolo montano degli strumenti chiamati *spettrometri*, che servono a determinare le firme spettrali delle superfici. Dato che questi strumenti sono in grado di osservare piccole porzioni di superficie terrestre (a causa anche

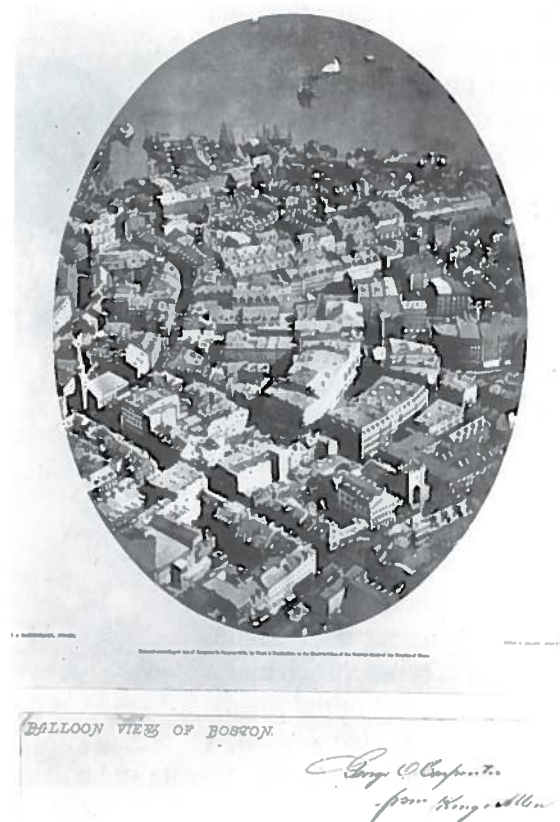


Figura 2.5. Vista di Boston ripresa da James Wallace Black nel 1860

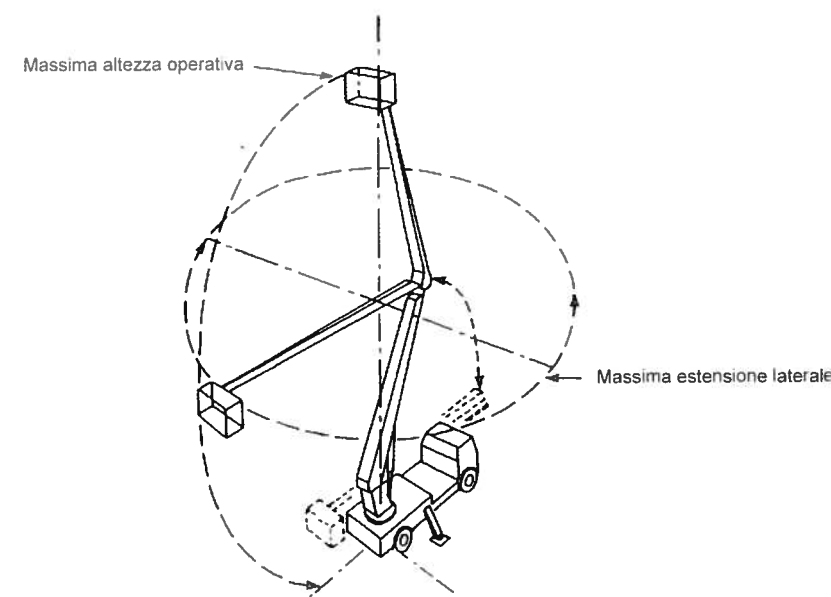


Figura 2.6. Esempio di piattaforma a terra con veicolo

della limitata altezza di osservazione), essi sono principalmente usati per raccogliere la verità a terra per la taratura delle immagini da satellite. Va detto, a proposito, che l'immagine da satellite e la verità a terra da piattaforma al suolo devono essere riprese nello stesso momento per poter essere confrontabili.

### 2.4. I sensori per il telerilevamento

In questo paragrafo saranno illustrati i principali sensori ottici passivi per il telerilevamento, analizzando la loro struttura e il loro funzionamento.

In generale, i sensori ottici passivi possono essere divisi in due grandi categorie: fotografici e non fotografici; i primi generano una registrazione della radiazione riflessa e/o emessa dal bersaglio su una pellicola fotografica che viene successivamente stampata su carta fotografica; i secondi codificano la radiazione registrata in formato digitale, memorizzando le immagini prodotte su supporti informatici per poi essere analizzate a video o stampate. Inoltre, i sensori fotografici operano nella regione spettrale del visibile e dell'infrarosso vicino (da 0,3 a 0,9  $\mu\text{m}$ ), mentre quelli non fotografici spaziano dai raggi x alle microonde, quindi praticamente su tutto lo spettro EM.

I sensori fotografici montati su piattaforme per il telerilevamento sono rappresentati essenzialmente da camere fotografiche. Questi apparecchi, sebbene diversi da quelli comunemente utilizzati per le riprese amatoriali da terra, si basano sul medesimo funzionamento: l'immagine inquadrata viene registrata da un'emulsione



presente sulla pellicola fotografica e il prodotto che si ottiene tramite reazioni fotochimiche è un negativo dell'immagine reale. Dato che le pellicole per riprese aeree sono di grande formato, l'immagine positiva si ottiene tramite stampa detta *a contatto* su un foglio di carta fotografica, anch'esso fotosensibile grazie a un'emulsione, senza passare attraverso un ingranditore.

Fino agli anni '60, i sensori utilizzati per il telerilevamento erano esclusivamente di tipo fotografico. Con l'inizio degli anni '70 e la messa in orbita del primo satellite Landsat, i sensori non fotografici hanno cominciato a prendere campo. Attualmente, a parte le camere fotografiche montate su aereo, la quasi totalità di sensori è di tipo non fotografico. Va detto, fra l'altro, che anche nel telerilevamento aereo, stanno prendendo sempre più campo le camere fotografiche digitali, con la conseguenza che quelle tradizionali andranno progressivamente scomparendo. Nel sottoparagrafo 2.4.1 si descriveranno in dettaglio questi strumenti, mentre nel paragrafo 2.5 si illustrerà la caratteristica fondamentale dei sensori: la *risoluzione*. Una trattazione sui sistemi fotografici è invece presente nel volume secondo di *L'osservazione della Terra – Fotointerpretazione*.

#### 2.4.1. Sensori ottici passivi non fotografici

Il sensore ottico passivo non fotografico più diffusamente utilizzato nel telerilevamento è il cosiddetto *sensore ad accoppiamento di carica*, chiamato anche CCD (*Coupled Charge Detector*), che misura e registra la radiazione ed è poi in grado di tradurla in un'immagine digitale.

Un CCD è un circuito integrato formato da una striscia o da una griglia di elementi semiconduttori, definiti anche *rilevatori* (*detectors* in inglese), capaci di accumulare una carica elettrica (da qui *charge*) proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica che li colpisce. Questi elementi sono accoppiati (*coupled*) in modo che ognuno di essi, sollecitato da un impulso elettrico, possa trasferire la propria carica all'elemento adiacente. Quando la radiazione colpisce il sensore e quindi i rilevatori, viene rilasciato un flusso di elettroni, quindi un segnale elettrico analogico proporzionale all'intensità dell'energia incidente. Attraverso un campionamento digitale, questo segnale viene trasformato in numeri interi digitali, definiti con termine inglese *digital numbers* (DN). Il DN rappresenta pertanto il valore numerico digitale codificato dell'energia elettromagnetica che ha colpito il rilevatore. Nel prosieguo del paragrafo saranno definiti più in dettaglio i criteri con cui sono codificati i DN.

Il sensore CCD può essere montato in modi differenti per raccogliere la radiazione proveniente dalla superficie terrestre. Esistono tre diverse geometrie di ripresa:

- centrale a matrice;
- non centrale a scansione puntuale (*whisk-broom*);
- non centrale a scansione lineare (*push-broom*).

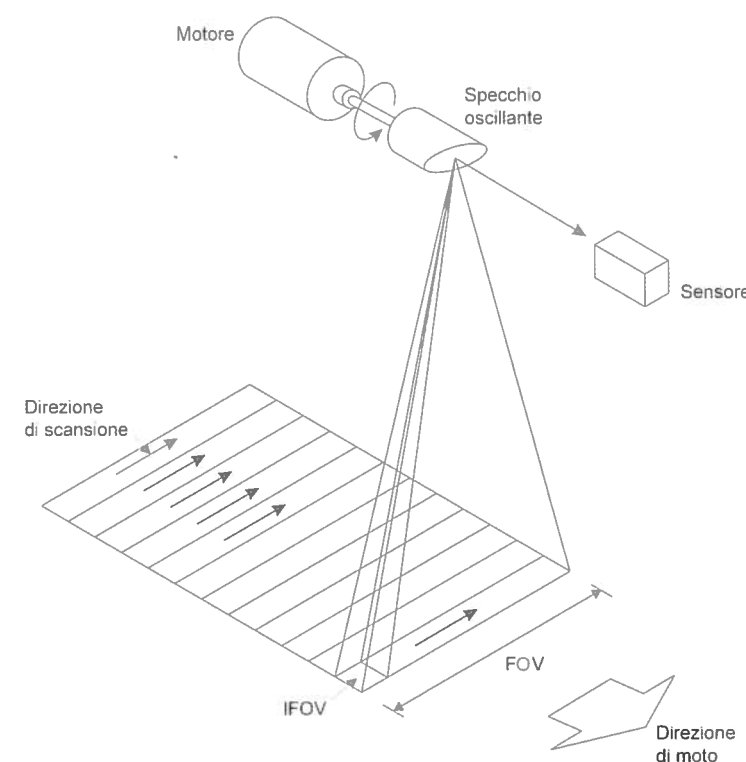


Figura 2.7. Schema di funzionamento dello scanner whisk-broom

La grande differenza fra queste tre geometrie di ripresa è che, mentre quella centrale acquisisce tutta l'immagine nello stesso istante, i sistemi non centrali, definiti anche *a scansione*, acquisiscono l'intera scena attraverso la mosaicatura di sotto-scene. In particolare, nel sistema *whisk-broom* le sotto-scene sono costituite da singole celle, mentre nel sistema *push-broom* sono singole righe.

Il sensore a matrice è costituito, come indica il suo stesso nome, da una matrice di rilevatori CCD, secondo forme quadrate o rettangolari. Il sensore registra l'immagine in una singola esposizione come le tradizionali camere fotografiche.

Lo *scanner whisk-broom* utilizza un singolo rilevatore CCD lineare che riesce ad acquisire la scena attraverso un sistema meccanico oscillante. Uno specchio viene fatto oscillare ortogonalmente alla traiettoria di volo della piattaforma in modo da riflettere la radiazione sul CCD e acquisire così una riga di immagine. Muovendosi lungo l'orbita, il CCD, all'oscillazione successiva dello specchio può acquisire una riga adiacente alla precedente. Proseguendo, tutta un'immagine viene acquisita, cella dopo cella, riga dopo riga (figura 2.7). Questo sistema è stato il primo utilizzato dalla serie dei satelliti Landsat.

Lo *scanner push-broom* è costituito da una barretta statica di rilevatori CCD in



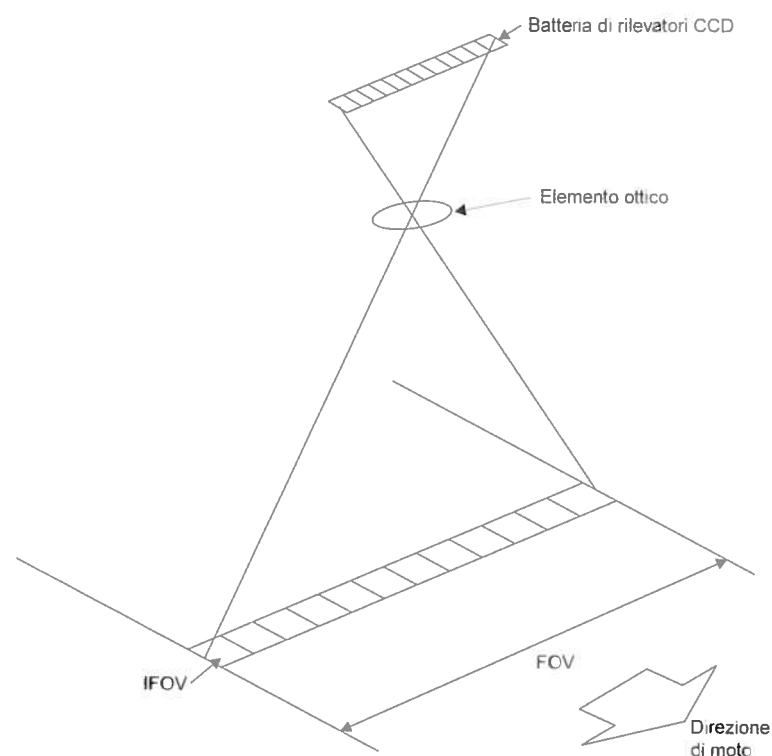


Figura 2.8. Schema di funzionamento dello scanner push-broom

sequenza e da un elemento ottico attraverso il quale la radiazione passa prima di colpire i rilevatori. Dato che la scansione della superficie terrestre avviene in questo caso linea dopo linea, la ripresa elementare per questo sensore risulta un'intera linea registrata dalla barretta di rilevatori. Il sensore è generalmente orientato trasversalmente alla direzione di volo (figura 2.8). I satelliti ad alta risoluzione di ultima generazione utilizzano il sistema *push-broom*, che sta progressivamente sostituendo il sistema *whisk-broom*.

## 2.5. La risoluzione degli strumenti

I sensori per il telerilevamento possono essere caratterizzati attraverso una loro proprietà fondamentale, definita come *risoluzione*, distinta in quattro tipologie diverse e più precise:

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

### 2.5.1. Risoluzione geometrica

La *risoluzione geometrica* o *spaziale* è data dalle dimensioni al suolo dell'area elementare di cui viene rilevata la radiazione elettromagnetica riflessa, definita anche *campo di vista istantaneo*, per il quale si usa l'acronimo IFOV (dall'inglese *Instantaneous Field Of View*). Ogni area elementare, in un'immagine generata da un sensore, viene rappresentata da una cella o pixel, all'interno della quale il valore della radiazione rilevata è unico. La matrice di pixel costituisce l'immagine stessa. Il campo di vista complessivo in senso ortogonale alla direzione di movimento del sensore è invece abbreviato con FOV (*Field Of View*). Si vedano a proposito le figure 2.7 e 2.8.

Più cresce la dimensione in metri terreno dei pixel di un'immagine, più diminuisce la risoluzione spaziale, poiché diminuisce la capacità di discriminazione degli oggetti. Viceversa, più diminuisce la dimensione del pixel, più cresce la risoluzione, poiché saranno sempre più piccoli gli elementi riconoscibili.

La dimensione a terra dei pixel è funzione delle caratteristiche strumentali e in particolare del cono angolare di visibilità del sensore, mentre è indipendente dalla quota di volo. In generale, nel panorama dei sensori per il telerilevamento attualmente disponibili, la risoluzione spaziale varia da poco meno di mezzo metro a vari chilometri. La figura 2.9 mostra la dimensione dei pixel di alcuni dei più comuni sensori



Figura 2.9. Confronto fra celle a risoluzione diversa e il tessuto urbano



Figura 2.10. Confronto fra tre immagini di una stessa zona ripresa a risoluzione spaziale diversa

rispetto alla tessitura di un centro urbano. Più alta è la risoluzione geometrica, più fedele alla realtà sarà la rappresentazione data dall'immagine della superficie della Terra (figura 2.10). Al di sotto della dimensione del pixel, non è possibile discernere oggetti diversi, ma va detto anche che, per riconoscere un determinato elemento, è necessario che esso sia di dimensioni ben più grandi di un singolo pixel.

Al fine di utilizzare un linguaggio comune nella descrizione della risoluzione geometrica, nella tabella 2.1 vengono date le definizioni di risoluzione associate a intervalli di dimensione del pixel.

Risoluzione spaziale (m)	Definizione
0,1-0,5	Altissima
0,5-1	Molto alta
1-4	Alta
4-12	Media
12-50	Medio bassa
50-250	Bassa
250-1000	Molto bassa
> 1000	Bassissima

Tabella 2.1. Definizione delle risoluzioni associate agli intervalli di dimensione del pixel

### 2.5.2. Risoluzione spettrale

La risoluzione spettrale definisce l'intervallo di lunghezza d'onda  $\lambda$  a cui è sensibile lo strumento. Ciascun intervallo di lunghezze d'onda viene definito come banda o canale spettrale e un sensore può essere sensibile alla radiazione in più intervalli di  $\lambda$  ovvero in più bande.

Un sensore ad alta risoluzione spettrale sarà quindi caratterizzato da un alto numero di bande spettrali, ciascuna delle quali sarà definita da un intervallo di lunghezze d'onda molto "stretto". La larghezza delle bande influisce infatti sulla capacità del sensore di discriminare differenti tipi di oggetti, aventi firme spettrali diverse. Un sensore capace di registrare la radiazione EM in numerosi intervalli spettrali è detto *multispettrale*. Generalmente questo tipo di sensori ha un numero

variabile fra quattro e quattordici canali. Quando il numero di bande raggiunge le centinaia, con ampiezze medie di ciascun canale inferiori ad  $1 \mu\text{m}$ , allora si parla di sensore *iperspettrale*; in tal caso le capacità discriminatorie sono molto maggiori e gli oggetti separabili in base alla loro risposta spettrale saranno molti di più. Tipicamente infatti mentre i sensori multispettrali vengono usati per i più disparati scopi del telerilevamento, gli iperspettrali, meno diffusi, trovano il loro utilizzo in campi molto specifici come ad esempio la ricerca mineraria o l'identificazione di strutture in amianto.

### 2.5.3. Risoluzione radiometrica

La risoluzione radiometrica è rappresentata dalla minima energia necessaria per stimolare il sensore affinché esso generi un segnale elettrico codificabile in un DN. Maggiore è la risoluzione radiometrica, maggiore sarà la capacità del sensore di registrare piccole differenze di energia.

Nel convertire il segnale elettrico analogico in digitale, viene usato un sistema di codifica binario, dove il numero di DN usati per rappresentare la gamma è dato da  $2^Q$ , dove  $Q$  è il numero di bit usato per la codifica. Ad esempio, in molti sistemi di telerilevamento, vengono usati 8 o 16 bit per la codifica, i quali determinano rispettivamente  $2^8 = 256$  DN e  $2^{16} = 65.536$  DN.

Ne segue che più alto è  $Q$ , più sono numerosi i DN, più alta sarà la risoluzione radiometrica; pertanto l'immagine digitale si avvicinerà maggiormente alla rappresentazione della realtà, poiché avrà a disposizione un numero di valori maggiore per codificare l'energia registrata. Questa proprietà è piuttosto evidente nel confronto fra le immagini della figura 2.11.

Ciascun DN dell'intervallo definito dalla codifica binaria, per scopi rappresentativi, viene associato a un colore di una scala cromatica. Questa scala è normalmente costituita da livelli o toni di grigio, con i due estremi corrispondenti al nero e al bianco. Per analogia alle fotografie in B/N, il colore nero è associato ai minimi valori di radianza registrati dal sensore, mentre il bianco ai massimi. Nel mezzo, la gamma dei grigi è associata ai valori di radianza intermedi.

In un'immagine digitale, ciascun pixel o cella porta un singolo valore di DN che

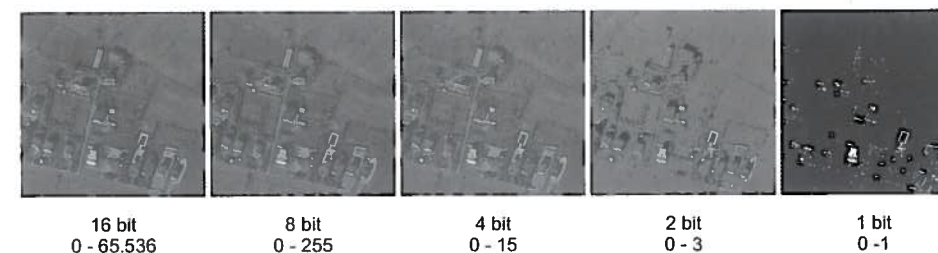


Figura 2.11. Confronto fra tre immagini di una stessa zona con differente risoluzione radiometrica



rappresenta la media dell'energia riflessa e/o emessa dalla porzione di superficie terrestre compresa in quel pixel. Ma di questo si parlerà più dettagliatamente nel capitolo 3.

#### 2.5.4. Risoluzione temporale

La risoluzione temporale rappresenta la capacità di un sensore di riprendere immagini di una stessa porzione di superficie terrestre con cadenza regolare e dipende dalla programmazione dell'orbita della piattaforma. Il periodo di tempo che intercorre tra due riprese successive della stessa area viene definito *tempo di rivisitazione*. Un'alta risoluzione temporale indica un tempo di rivisitazione basso, quindi una maggiore frequenza di immagini sulla stessa area. L'effetto opposto si ha con una bassa risoluzione temporale.

Attraverso le orbite quasi-polari eliosincrone e in virtù del moto rotatorio della Terra, i satelliti, ogni volta che compiono un'orbita, non tornano sulla stessa verticale della superficie terrestre, ma osservano una zona spostata verso ovest. La rivisitazione della stessa area non avviene pertanto se non dopo un certo numero di orbite, che dipende sia dalle caratteristiche intrinseche della piattaforma sia dall'ampiezza della striscia di terreno ripresa (ossia il FOV). Tuttavia, alcuni strumenti di ripresa di ultima generazione sono anche in grado di orientare il proprio campo di visuale e quindi riprendere in un dato passaggio la zona acquisita al passaggio precedente, abbassando notevolmente il tempo di rivisitazione e quindi aumentando la risoluzione temporale. Questo tipo di ripresa è di solito effettuato solo su commissione e comporta aumenti del costo delle immagini.

### 2.6. Panoramica dei principali sensori per telerilevamento

#### 2.6.1. Cenni introduttivi

La maggior parte dei sensori preposti all'acquisizione di immagini telerilevate disponibili per uso civile è stata ed è tuttora montata su piattaforme satellitari. Solo una parte marginale è aerotrasportata e raramente viene utilizzata per scopi commerciali. Per questo motivo, si approfondirà principalmente l'argomento dei sensori satellitari, dedicando solo qualche cenno a quelli aerotrasportati.

La nascita del telerilevamento moderno si fa coincidere con la messa in orbita, il 23 luglio 1972, del primo satellite artificiale per l'osservazione della Terra: il Landsat 1, altrimenti detto ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*). Da quel momento in poi, il numero di satelliti con a bordo sensori per telerilevamento terrestre messi in orbita è aumentato vertiginosamente e, dopo gli Stati Uniti, numerose altre nazioni hanno realizzato e messo in funzione i loro strumenti, fra cui la Francia e altri paesi europei consorziati nell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), la Russia, l'India, Israele e il Giappone.

Dal 1972, i sensori per il telerilevamento hanno visto un'enorme evoluzione soprattutto sotto il piano della risoluzione spaziale e spettrale, ma anche di quella radiometrica. Il primo Landsat montava il sensore MSS (*Multi Spectral Scanner*) che generava immagini con risoluzione a terra di 80 m e possedeva 4 bande spettrali. Le immagini erano campionate a 6 bit (64 livelli di grigio). L'ultimo nato della generazione Landsat, l'ETM+, sebbene ad oggi non più funzionante, ha una risoluzione spaziale di 15 m (nella banda pancromatica), ben 8 bande spettrali e immagini campionate a 8 bit. Esistono tuttavia sensori attualmente disponibili che hanno un pixel di 0,50 m al suolo e campionamento a 16 bit, mentre altri (sempre nell'ambito dei sensori commerciali) hanno fino a 7 bande solo nell'infrarosso medio.

La tendenza è quindi evidente: andare progressivamente verso un potenziamento delle risoluzioni, specialmente la geometrica, la spettrale e la radiometrica. Tutto questo è sicuramente auspicabile, ma è necessario che vada di pari passo con un'evoluzione dei sistemi informatici che devono poi gestire le immagini; infatti a maggiore risoluzione spaziale corrispondono immagini con più pixel; risoluzione radiometrica più alta significa che ciascun pixel occupa più memoria e, infine, risoluzione spettrale maggiore significa che l'informazione telerilevata è moltiplicata per un numero maggiore di bande. Il risultato è la necessità di computer sempre più potenti, con hard disk o altri supporti di memorizzazione sempre più capienti per contenere tutta questa mole di dati.

#### 2.6.2. Le bande spettrali

Prima di illustrare le caratteristiche di ciascun sensore è opportuno soffermarsi sul concetto di banda spettrale e sulle proprietà di ciascun intervallo spettrale in relazione all'osservazione della Terra. Per questo si darà una breve descrizione degli ambiti applicativi delle più comuni finestre spettrali osservate dai sensori:

- 0,50-0,75  $\mu\text{m}$  (pancromatico-pan): questa banda ha una limitata definizione spettrale, essendo molto larga (0,25  $\mu\text{m}$ ), ma riesce a raggiungere risoluzioni spaziali fino a 4 volte maggiori rispetto alle bande multi spettrali; per questo è utilizzata per la fotointerpretazione degli elementi del territorio; normalmente la banda pancromatica viene utilizzata da sola, rappresentata in toni di grigio, oppure può essere combinata con bande multispettrali attraverso una procedura definita di *fusione dati* o anche *pan-sharpening*, a cui si accennerà nel paragrafo 3.4.5;
- 0,45-0,52  $\mu\text{m}$  (blu-verde): questo intervallo spettrale è usato per lo studio della trasparenza dell'acqua, grazie alla capacità della radiazione in queste lunghezze d'onda di penetrare seppur limitatamente nei corpi idrici; in questa banda si risente purtroppo dei maggiori effetti di disturbo atmosferici;
- 0,52-0,60  $\mu\text{m}$  (verde): banda utilizzata per osservare il picco di riflettanza della vegetazione nel visibile e valutarne il vigore;



- 0,63-0,69  $\mu\text{m}$  (rosso): banda di grande importanza per diversificare la vegetazione, grazie ai differenti valori di assorbimento della clorofilla nelle varie specie; la diversificazione si fa solitamente mettendo a confronto questa banda con quella posizionata nell'infrarosso vicino, attraverso indici di vegetazione (vedere paragrafo 3.4.3); fra le bande nel visibile è quella che risente meno dell'effetto atmosferico; per questo gli elementi della superficie terrestre appaiono più nitidi rispetto alle due precedenti;
- 0,76-0,90  $\mu\text{m}$  (infrarosso vicino): grazie al picco massimo di riflettanza della vegetazione in questa regione dello spettro, questa banda viene usata per gli studi sulla biomassa e sulla quantità d'acqua delle piante;
- 1,55-1,75  $\mu\text{m}$  (infrarosso vicino): in questa regione la riflettanza della vegetazione è fortemente dipendente dalla sua umidità; la banda risulta quindi molto utile per rilevare lo stress idrico delle piante, ma anche per discriminare i suoli in relazione al contenuto d'acqua; in questa regione è infine possibile separare le nuvole dalla neve, cosa difficile nelle bande del visibile e dell'infrarosso vicino, in quanto le prime riflettono la radiazione mentre la seconda la assorbe;
- 2,08-2,35  $\mu\text{m}$  (infrarosso vicino): banda molto potente nella discriminazione fra rocce diverse (dove siano affioranti), specialmente se sottoposte a diversa alterazione idrotermale;
- 10,4-12,5  $\mu\text{m}$  (infrarosso lontano o termico): intervallo spettrale in cui viene registrata la radiazione emessa dalla superficie terrestre. Questa radiazione è legata alla temperatura assoluta della superficie, per cui è possibile ottenere immagini termiche.

### 2.6.3. I sensori

Nelle prossime pagine si illustreranno le caratteristiche di un certo numero di sensori montati su piattaforme satellitari che attualmente forniscono immagini telerilevate. La lista non è esauriente, in quanto l'interesse è focalizzato su quei sensori che forniscono immagini utili per studi di dettaglio e per la fotointerpretazione. Si sono pertanto trascurati i satelliti meteorologici o altri destinati ad analisi a livello globale.

Le immagini prodotte dai sensori sono distribuite sia da compagnie o enti che hanno messo in orbita lo strumento sia da società localizzate nei vari paesi che possiedono stazioni di ricezione dei dati provenienti dal satellite o che acquisiscono da queste le immagini e le ridistribuiscono. In generale, quasi tutte le immagini satellitari sono a pagamento. Solo nel caso del Landsat e di qualche altro sensore, sono state rese disponibili gratuitamente immagini di archivio presso il sito del *Global Land Cover Facility* (GLCF – [www.landcover.org](http://www.landcover.org)).

Nel prosieguo del paragrafo, oltre a fornire una schematica descrizione delle caratteristiche principali dei vari sensori, si indicheranno anche i riferimenti sul

web dei distributori. Non sarà invece indicato il prezzo, in quanto variabile, per il quale si suggerisce di consultare i siti delle compagnie che si occupano della vendita di immagini sul territorio italiano. Ulteriori dettagli possono essere reperiti anche dalla bibliografia o su Internet agli indirizzi segnalati.

Di ogni sensore si forniranno informazioni sulle risoluzioni:

- spaziale, indicando la dimensione al suolo del pixel in metri;
- spettrale, indicando il numero di bande e gli intervalli spettrali di ciascuna di esse;
- radiometrica, attraverso il numero di bit a cui sono campionate le immagini;
- temporale, fornendo il tempo di rivisitazione.

Si daranno inoltre informazioni sul campo di vista di ciascuno strumento, che prende il nome di *swath* e che definisce la larghezza in km delle immagini generate. Di solito l'immagine ripresa dal sensore, avente le dimensioni pari allo *swath*, prende il nome di *scena*. È comune che i distributori di dati satellitari mettano in vendita anche ritagli di scene (di solito sottomultipli, tipo un quarto), che prendono il nome di *sub-scene*.

#### 2.6.3.1. La famiglia dei satelliti Landsat

Il primo satellite che si andrà a descrivere è il Landsat, prodotto dalla NASA e, a ragione, definibile come il padre di tutti i satelliti per il telerilevamento. Tralasciando il sensore MSS, non più attivo e ormai obsoleto, sono due i sensori tuttora disponibili: il *Thematic Mapper* (TM) montato sul Landsat 5 e l'*Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), montato sul Landsat 7. Al momento tuttavia il Landsat 7 è fuori uso da ormai sette anni, per cui sono disponibili solo immagini d'archivio del periodo compreso tra il 1999, data della sua messa in orbita, e il 2003 in cui ha smesso di trasmettere. Attualmente l'unico Landsat funzionante è il 5, con il "vecchio" sensore TM. Qualora anche questo satellite cessasse di funzionare, non è prevista la continuazione della missione con nuovi strumenti.

#### LANDSAT 5 (NASA-USA) – SENSORE TM

##### Specifiche tecniche:

- data di lancio: 1 marzo 1984;
- operatività: attualmente in funzione; riprese sospese fra novembre 2005 e gennaio 2006;
- quota di volo: 705 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena (*swath*): 185 km;
- risoluzione radiometrica: 8 bit;
- risoluzione temporale: 16 giorni;
- modalità di ripresa: in continuo.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
1. Visibile, blu	0,45-0,52	30
2. Visibile, verde	0,52-0,60	
3. Visibile, rosso	0,63-0,69	
4. Infrarosso vicino	0,76-0,90	
5. Infrarosso vicino	1,55-1,75	
7. Infrarosso vicino	2,08-2,35	120
6. Infrarosso termico	10,4-12,5	

Tabella 2.2. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [www.e-geos.it](http://www.e-geos.it);
- [landsat.gsfc.nasa.gov](http://landsat.gsfc.nasa.gov);
- [landsat.usgs.gov](http://landsat.usgs.gov);
- [landcover.org](http://landcover.org).

## LANDSAT 7 (NASA-USA) — SENSORE ETM+

*Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 15 aprile 1999;
- operatività: fuori uso dal maggio 2003;
- quota di volo: 705 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 185 km;
- risoluzione radiometrica: 8 bit;
- risoluzione temporale: 16 giorni;
- modalità di acquisizione: in continuo.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
1. Visibile, blu	0,45-0,52	30
2. Visibile, verde	0,52-0,60	
3. Visibile, rosso	0,63-0,69	
4. Infrarosso vicino	0,76-0,90	
5. Infrarosso vicino	1,55-1,75	
7. Infrarosso vicino	2,08-2,35	60
6. Infrarosso termico	10,4-12,5	
8. Pancromatico	0,50-0,90	15

Tabella 2.3. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- si veda Landsat 5.

## 2.6.3.2. I satelliti francesi Spot

Fin dalla fine degli anni '80 l'Agenzia spaziale francese (CNES: *Centre National*

*d'Etudes Spatiales*) ha intrapreso il programma SPOT, finalizzato alla messa in orbita di satelliti per l'osservazione della Terra. SPOT 1 è stato messo in orbita nel 1986; nel 1990 e 1993 hanno fatto seguito SPOT 2 e 3, con caratteristiche analoghe ai precedenti.

All'interno del Programma europeo per il controllo globale della vegetazione (*Vegetation Programme*), sono stati sviluppati i due nuovi satelliti SPOT 4 e 5, lanciati in orbita nel 1998 e nel 2002, che integrano e migliorano le caratteristiche dei precedenti.

## SPOT 4 (CNES-FRANCIA) — SENSORE HRVIR

*Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 24 marzo 1998;
- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 832 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 60 km in ripresa verticale (il sensore è progettato per riprendere anche con angolazione fino a  $\pm 27^\circ$ , per realizzare ripetitività a breve termine e stereoscopia, per cui l'ampiezza varia fino a 80 km);
- risoluzione radiometrica: 8 bit;
- risoluzione temporale: 26 giorni nominali, anche se le riprese vengono effettuate in gran parte su programmazione; non esiste quindi una copertura continua della superficie terrestre;
- modalità di acquisizione: su richiesta.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
1. Visibile, verde	0,50-0,59	20
2. Visibile, rosso	0,61-0,68	
3. Infrarosso vicino 1	0,78-0,89	
4. Infrarosso vicino 2	1,58-1,75	
5. Monocromatica	0,61-0,68	10

Tabella 2.4. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [www.spotimage.fr](http://www.spotimage.fr).

## SPOT 5 (CNES-FRANCIA) — SENSORE HRG

*Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 3 maggio 2002;
- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 832 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;

- ampiezza della scena: 60 km in ripresa verticale (il sensore è progettato per riprendere anche con angolazione fino a  $\pm 27^\circ$ , per realizzare ripetitività a breve termine e stereoscopia, per cui l'ampiezza varia fino a 80 km);
- risoluzione radiometrica: 8 bit;
- risoluzione temporale: 26 giorni nominali. Vale quanto detto per lo SPOT 4 sulle riprese programmate;
- modalità di acquisizione: su richiesta.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
1. Visibile, verde	0,50-0,59	10
2. Visibile, rosso	0,61-0,68	
3. Infrarosso vicino	0,78-0,89	
4. Infrarosso vicino	1,58-1,75	20
5. Pancromatica	0,48-0,71	5 e 2,5

Tabella 2.5. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- si veda SPOT 4.

**2.6.3.3. I satelliti indiani**

Facendo seguito ai lanci dimostrativi dei due satelliti della serie *Bhaskara* fra la fine degli anni '70 e l'inizio degli anni '80, l'India ha iniziato a sviluppare il proprio programma di messa in orbita di satelliti per l'osservazione della Terra IRS (*Indian Remote Sensing*), culminato con il lancio del primo strumento operativo IRS 1A nel 1988. A questo sono seguiti altri 14 satelliti di cui l'ultimo è entrato in funzione alla fine del 2009. Se si considera che solo uno, l'IRS P1, è andato distrutto durante il lancio, i satelliti indiani, ad oggi, rappresentano la più numerosa costellazione per l'osservazione della Terra.

**IRS 1C/1D (ISRO-INDIA) — SENSORI PAN E LISS 3***Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 28 dicembre 1995 (IRS 1C) e 20 settembre 1997 (IRS 1D);
- operatività: solo l'IRS 1D è attualmente in funzione;
- quota di volo: 817 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 63-70 km (Pan), 127-141 km (LISS);
- risoluzione radiometrica: 6 bit;
- risoluzione temporale: 24 giorni;
- modalità di acquisizione: in continuo.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
1 (Pan) — Pancromatica	0,50-0,75	5,8
2 (LISS 3) — Visibile, verde	0,52-0,59	23
3 (LISS 3) — Visibile, rosso	0,62-0,68	
4 (LISS 3) — Infrarosso vicino	0,77-0,86	
5 (LISS 3) — Infrarosso vicino	1,55-1,70	69

Tabella 2.6. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [www.isro.org](http://www.isro.org);
- [www.e-geos.it](http://www.e-geos.it).

**IRS P6/RESOURCESAT-1 (ISRO-INDIA) — SENSORI LISS 3 E LISS 4***Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 17 ottobre 2003;
- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 817 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 70,3 km (LISS 4), 141 km (LISS 3);
- risoluzione radiometrica: 7 bit;
- risoluzione temporale: 24 giorni;
- modalità di acquisizione: in continuo.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
1. Visibile, verde	0,52-0,59	24
2. Visibile, rosso	0,62-0,68	
3. Infrarosso vicino	0,77-0,86	
4. Infrarosso medio	1,55-1,70	

Tabella 2.7a. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica liss 3

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
2. Visibile, verde	0,52-0,59	6
3. Visibile, rosso	0,62-0,68	6
4. Infrarosso vicino	0,77-0,86	6

Tabella 2.7b. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica liss 4

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- si veda IRS 1C/1D.

**CARTOSAT 1 (ISRO-INDIA)***Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 5 maggio 2005;



- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 618 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 30 km (coppia stereoscopica), 26,855 km (visione monoscopica);
- risoluzione radiometrica: 10 bit;
- risoluzione temporale: 5 giorni;
- modalità di acquisizione: in continuo.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
Pancromatico	0,500-0,850	2,5

Tabella 2.8. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- si veda IRS 1C/1D.

## IRS 2A/CARTOSAT 2 (ISRO-INDIA)

*Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 10 gennaio 2007;
- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 633 km;
- orbita: elio-sincrona polare;
- ampiezza della scena: 9,6 km;
- risoluzione radiometrica: 10 bit;
- risoluzione temporale: 5 giorni;
- modalità di acquisizione: in continuo.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
Pancromatico	0,500-0,850	< 1

Tabella 2.9. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- vedere IRS 1C/1D.

## CARTOSAT 2A (ISRO-INDIA)

*Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 28 aprile 2008;
- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 635 km;
- orbita: elio-sincrona polare;

- ampiezza della scena: 9,6 km;
- risoluzione radiometrica: 10 bit;
- risoluzione temporale: 4 giorni;
- modalità di acquisizione: in continuo.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
Pancromatico	0,500-0,850	< 1

Tabella 2.10. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- si veda IRS 1C/1D.

## 2.6.3.4. Il sensore ASTER

Nel 1999, con una collaborazione fra la NASA e due organismi giapponesi, il Ministero dell'economia giapponese e l'ERSDAC (*Earth Remote Sensing Data Analysis Center*), è stato messo in orbita il satellite EOS-AM Terra, con a bordo cinque sensori. Uno di questi è ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), un sensore multispettrale in grado di misurare la radiazione sia riflessa sia emessa dalla superficie terrestre (quest'ultima nella regione dell'infrarosso termico). Il sensore opera in tre diverse regioni dello spettro: il visibile e l'infrarosso vicino (VNIR), l'infrarosso medio (SWIR) e l'infrarosso termico (TIR). In ciascuna di queste regioni esso genera immagini a risoluzione spaziale diversa. Nonostante non abbia una copertura completa della regione del visibile, la risoluzione di 15 metri nel VNIR e il basso costo ne fanno un prodotto interessante.

## ASTER (USA-GIAPPONE) — SENSORI VNIR E SWIR

*Specifiche:*

- data di lancio: 18 dicembre 1999;
- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 705 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 60 km;
- risoluzione radiometrica: 8 bit per le bande VNIR e SWIR e 12 bit per le bande TIR;
- risoluzione temporale: 16 giorni;
- modalità di acquisizione: discontinua, pari a circa 8 minuti di ripresa ogni orbita.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
VNIR 1 – Visibile, verde	0,52-0,60	15
VNIR 2 – Visibile, rosso	0,63-0,69	
VNIR 3n/3b – Infrarosso vicino	0,78-0,86	
SWIR 4 – Infrarosso vicino	1,60-1,70	30
SWIR 5 – Infrarosso vicino	2,145-2,185	
SWIR 6 – Infrarosso vicino	2,185-2,225	
SWIR 7 – Infrarosso vicino	2,235-2,285	
SWIR 8 – Infrarosso vicino	2,295-2,365	
SWIR 9 – Infrarosso vicino	2,360-2,430	
TIR 10 – Infrarosso termico	8,125-8,475	90
TIR 11 – Infrarosso termico	8,475-8,825	
TIR 12 – Infrarosso termico	8,925-9,275	
TIR 13 – Infrarosso termico	10,25-10,95	
TIR 14 – Infrarosso termico	10,95-11,65	

Tabella 2.11. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [asterweb.jpl.nasa.gov](http://asterweb.jpl.nasa.gov);
- [www.e-geos.it](http://www.e-geos.it);
- [landcover.org](http://landcover.org);
- [wist.echo.nasa.gov/wist-bin/api/ims.cgi](http://wist.echo.nasa.gov/wist-bin/api/ims.cgi);
- [imsweb.aster.ersdac.or.jp/ims/html/MainMenu/MainMenu.html](http://imsweb.aster.ersdac.or.jp/ims/html/MainMenu/MainMenu.html);
- [glovis.usgs.gov](http://glovis.usgs.gov).

**2.6.3.5. I sensori commerciali ad altissima risoluzione**

Il 27 aprile 1999 fu lanciato in orbita il primo sensore commerciale ad altissima risoluzione, *Ikonos-1*. Purtroppo il lancio fallì, poiché il satellite non riuscì a distaccarsi dal razzo vettore; solo qualche mese dopo, nel settembre dello stesso anno, la messa in orbita di *Ikonos-2* riuscì perfettamente. Da quel momento il telerilevamento ha fatto un salto di qualità non indifferente, poiché si sono rese disponibili immagini della superficie terrestre con risoluzioni fino ad allora riservate alle sole competenze militari: il sensore di *Ikonos-2* ha una risoluzione geometrica di 0,82 m, *Quickbird-2*, un altro satellite con sensore ad altissima risoluzione entrato in funzione nell'ottobre 2001, arriva a 0,61 m, mentre recentemente, tra il 2007 e il 2009, sono stati messi in orbita tre nuovi satelliti della serie *Worldview* e *Geoeye* con risoluzioni spaziali nella banda pancromatica addirittura al di sotto del mezzo metro. Le immagini fornite da questi strumenti sono in tutto e per tutto confrontabili con le ortofoto, con il vantaggio che il breve tempo di rivisitazione permette la programmazione di acquisizioni molto frequenti.

**IKONOS 2 (GEOEYE, USA)***Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 24 settembre 1999;
- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 681 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 11 km;
- risoluzione radiometrica: 11 bit;
- risoluzione temporale: 3 giorni;
- modalità di acquisizione: a richiesta.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
Pancromatico	0,526-0,929	0,82
Visibile – blu	0,445-0,516	3,2
Visibile – verde	0,506-0,595	
Visibile – rosso	0,632-0,698	
Infrarosso vicino	0,757-0,853	

Tabella 2.12. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [www.geoeye.com](http://www.geoeye.com);
- [www.e-geos.it](http://www.e-geos.it).

**ORBVVIEW 3 (GEOEYE-USA)***Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 26 giugno 2003;
- operatività: non più operativo dal marzo 2007;
- quota di volo: 470 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 8 km in ripresa verticale;
- risoluzione radiometrica: 11 bit;
- risoluzione temporale: meno di 3 giorni;
- modalità di acquisizione: solo a richiesta.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
Pancromatico	0,450-0,900	1
Visibile – blu	0,450-0,520	4
Visibile – verde	0,520-0,600	
Visibile – rosso	0,625-0,695	
Infrarosso vicino	0,760-0,900	

Tabella 2.13. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [www.geoeye.com](http://www.geoeye.com).

## GEOEYE 1 (GEOEYE-USA)

*Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 6 settembre 2008;
- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 681 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 15,2 km in ripresa verticale;
- risoluzione radiometrica: 11 bit;
- risoluzione temporale: circa 3 giorni;
- modalità di acquisizione: solo a richiesta.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
Pancromatico	0,450-0,800	0,41
Visibile – blu	0,450-0,510	1,64
Visibile – verde	0,510-0,580	
Visibile – rosso	0,655-0,690	
Infrarosso vicino	0,780-0,920	

Tabella 2.14. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [www.geoeye.com](http://www.geoeye.com);
- [www.e-geos.it](http://www.e-geos.it).

## QUICKBIRD (DIGITALGLOBE-USA)

*Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 18 ottobre 2001;
- operatività: attualmente funzionante;
- quota di volo: 450 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 16,5 km in ripresa verticale;
- risoluzione radiometrica: 11 bit;
- risoluzione temporale: da 1 a 3,5 giorni a seconda della latitudine;
- modalità di acquisizione: solo a richiesta.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
Visibile – blu	0,45-0,52	2,44 verticale 2,88 a 25° inclinazione
Visibile – verde	0,52-0,60	
Visibile – rosso	0,63-0,69	
Infrarosso vicino	0,76-0,90	
Pancromatico	0,45-0,90	0,61 verticale 0,72 a 25° inclinazione

Tabella 2.15. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [www.digitalglobe.com](http://www.digitalglobe.com);
- [www.e-geos.it](http://www.e-geos.it).

## WORLDVIEW 1 (DIGITALGLOBE-USA)

*Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 18 settembre 2007;
- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 496 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 17,6 km per riprese verticali;
- risoluzione radiometrica: 11 bit;
- risoluzione temporale: 1,7 giorni;
- modalità di acquisizione: solo a richiesta.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
Pancromatico	0,400-0,900	0,50 verticale 0,55 a 20° inclinazione

Tabella 2.16. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [www.digitalglobe.com](http://www.digitalglobe.com);
- [www.e-geos.it](http://www.e-geos.it).

## WORLDVIEW 2 (DIGITAL GLOBE-USA)

*Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 8 ottobre 2009;
- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 770 km;
- orbita: elio-sincrona quasi-polare;
- ampiezza della scena: 16,4 km in ripresa verticale;
- risoluzione radiometrica: 11 bit;
- risoluzione temporale: 1,1 giorni;
- modalità di acquisizione: solo a richiesta.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
Pancromatico	0,450-0,800	0,46
Visibile – <i>coastal</i>	0,400-0,450	1,84
Visibile – blu	0,450-0,510	
Visibile – verde	0,510-0,580	
Visibile – giallo	0,585-0,625	
Visibile – rosso	0,630-0,690	
Visibile – <i>red edge</i>	0,705-0,745	
Infrarosso vicino 1	0,770-0,895	
Infrarosso vicino 2	0,860-1,040	

Tabella 2.17. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica



*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [www.digitalglobe.com](http://www.digitalglobe.com);
- [www.e-geos.it](http://www.e-geos.it).

**2.6.3.6. I sensori israeliani della serie EROS**

EROS rappresenta una serie di satelliti commerciali di produzione israeliana, gestiti dalla società *Imagesat International*, che ne distribuisce anche le immagini. Al momento sono funzionanti due esemplari, EROS A e B, mentre la data di lancio del prossimo satellite EROS C non è al momento nota, in quanto non sono ancora iniziati i lavori per la sua realizzazione. I sensori a bordo di queste piattaforme presentano una singola banda pancromatica a risoluzione geometrica da alta a molto alta.

**EROS A (ISRAELE)***Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 5 dicembre 2000;
- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 480 km;
- orbita: elio-sincrona polare;
- ampiezza della scena: 14 km in ripresa verticale;
- risoluzione radiometrica: 10 bit;
- risoluzione temporale: 2 giorni;
- modalità di acquisizione: N.D.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
Pancromatico	0,500-0,900	1,9

**Tabella 2.18. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica***Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [www.imagesatintl.com](http://www.imagesatintl.com);
- [www.iptsat.com](http://www.iptsat.com).

**EROS B (ISRAELE)***Specifiche tecniche:*

- data di lancio: 25 aprile 2006;
- operatività: attualmente in funzione;
- quota di volo: 500 km circa;
- orbita: elio-sincrona polare;
- ampiezza della scena: 7 km in ripresa verticale;
- risoluzione radiometrica: 10 bit;

- risoluzione temporale: 2 giorni;
- modalità di acquisizione: N.D.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica (m)
Pancromatico	0,500-0,900	0,7

**Tabella 2.19. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica***Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- si veda EROS A.

**2.6.3.7. I sensori aerotrasportati multispettrali e iperspettrali**

Oltre ai numerosi sensori montati su piattaforme satellitari descritti finora, esiste una serie di strumenti che vengono utilizzati a bordo di aeroplani o elicotteri per riprese a quote più basse. Il loro utilizzo è spesso per progetti specifici, su aree generalmente di estensione limitata, ma in alcuni casi anche per coperture sull'intero territorio nazionale.

In questa sede si descriveranno due sensori aerotrasportati gestiti dalla società Blom CGR di Parma: rispettivamente il sensore multispettrale ADS40 e quello iperspettrale MIVIS (quest'ultimo di proprietà del CNR).

**SENSORE DIGITALE ADS40 (AERIAL DIGITAL SENSOR 40)**

ADS40 è un sensore sviluppato dalla società Leica LH Systems in collaborazione con il Centro aerospaziale tedesco ed è realizzato per essere montato e operare a bordo di un aeroplano. Possiede una serie di CCD per l'acquisizione simultanea di immagini in una serie di quattro bande multispettrali, tre nel campo del visibile e una nell'infrarosso vicino. Le immagini acquisite sono direttamente georeferenziate all'atto della registrazione.

Il sensore ADS40 viene utilizzato da Blom CGR dal 2004 per la realizzazione dell'ortofoto *TerraItaly* di tutto il territorio nazionale italiano.

*Specifiche tecniche:*

- data di immissione nel mercato: 2000;
- quota di volo: variabile;
- ampiezza della scena (*Field of View*): 64°;
- luminosità: f/4 fissa;
- lunghezza focale equivalente della camera: 62,77 mm;
- risoluzione radiometrica: 12 bit;
- modalità di acquisizione: a progetto.

Bande spettrali	Intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Risoluzione geometrica
Blu	0,428-0,492	Variabile: 10 cm ogni 1000 m di quota
Verde	0,533-0,587	
Rosso	0,608-0,662	
nir	0,835-0,885	

Tabella 2.20. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [www.blom.no/blom-cgr/it](http://www.blom.no/blom-cgr/it).

SCANNER IPERSPETTRALE MIVIS (*MULTISPECTRAL INFRARED AND VISIBLE IMAGING SPECTROMETER*)

Il MIVIS (*Multispectral Infrared And Visible Imaging Spectrometer*) è uno strumento modulare realizzato dalla ditta Daedalus (USA) e costituito da quattro spettrometri che registrano in maniera simultanea la radiazione proveniente dalla superficie terrestre in altrettante regioni dello spettro elettromagnetico: visibile, infrarosso vicino, infrarosso medio e infrarosso termico. In ciascuna di queste regioni la registrazione della radiazione EM avviene in un numero considerevole di bande spettrali (per un totale di 102) di larghezza generalmente molto piccola (fino a  $0,009 \mu\text{m}$ ), fatto che permette un'identificazione molto accurata delle varie superfici sulla base delle loro firme spettrali e quindi applicazioni in vari campi, come la botanica l'agricoltura, la geologia e la geomorfologia, la pedologia, l'idrologia, l'oceanografia e le scienze atmosferiche.

Dal 1994 il sensore MIVIS è stato acquistato dal Consiglio Nazionale delle Ricerche e installato su piattaforme aeree della società Blom CGR. Non è disponibile per un utilizzo commerciale, ma viene impiegato dal CNR per progetti di ricerca.

*Specifiche tecniche:*

- quota di volo: variabile;
- ampiezza della scena (*Field of View*):  $71,059^\circ$ ;
- campo di vista istantaneo (IFOV): 2 milliradiani;
- risoluzione radiometrica: 12 bit;
- modalità di acquisizione: a progetto.

Spettrometro	Regioni spettrali	Bande	intervallo spettrale ( $\mu\text{m}$ )	Ampiezza bande ( $\mu\text{m}$ )
1	Visibile	1-20	0,430-0,830	0,02
2	nir	21-28	1,150-1,550	0,05
3	mir	29-92	1,983-2,478	0,009
4	tir	93-102	8,180-12,700	0,340-0,540

Tabella 2.21. Caratteristiche spettrali e risoluzione geometrica

*Informazioni aggiuntive e distribuzione:*

- [www.blom.no/blom-cgr/it](http://www.blom.no/blom-cgr/it);
- [www.cnr.it/consulenza/Lara.html](http://www.cnr.it/consulenza/Lara.html).

## 2.6.3.8. I sensori prossimamente in orbita

## GEOEYE 2 (GEOEYE - USA)

Il lancio del satellite GEOEYE 2 è pianificato per il 2012 o 2013 e porterà in orbita il sensore con la più alta risoluzione spaziale disponibile per scopi commerciali. Le immagini prodotte avranno infatti un pixel di soli 25 cm di lato. Sembra tuttavia che la massima risoluzione sarà posta sotto uso ristretto di enti governativi statunitensi, lasciando a disposizione per gli usi commerciali immagini sottocampionate a 50 cm.

### 3. L'ELABORAZIONE E LA TRASFORMAZIONE DELLE IMMAGINI DA TELERILEVAMENTO

#### 3.1. Le caratteristiche delle immagini telerilevate

##### 3.1.1. Il concetto di immagine digitale

I sensori per il telerilevamento di tipo passivo, attraverso i loro rilevatori (*detectors*), raccolgono e registrano la radiazione proveniente dalla superficie terrestre e la convertono in immagini digitali. Queste immagini possono essere definite da un punto di vista *spaziale* e da uno *radiometrico*.

Da un punto di vista *spaziale*, un'immagine digitale telerilevata è una distribuzione ordinata bidimensionale di celle o pixel (acronimo per *picture element*) in forma di matrice (figura 3.1). In essa possono essere individuate un certo numero di righe e di colonne. Ogni pixel è localizzato dalle coordinate espresse in termini di numero di colonne e numero di righe contate a partire da un'origine ed è caratterizzato da un valore numerico. Questo valore è il *digital number* (DN) che gli viene assegnato nella conversione della radiazione registrata dal sensore in segnale elettrico prima e in valore digitale dopo. Ogni pixel è inoltre caratteriz-

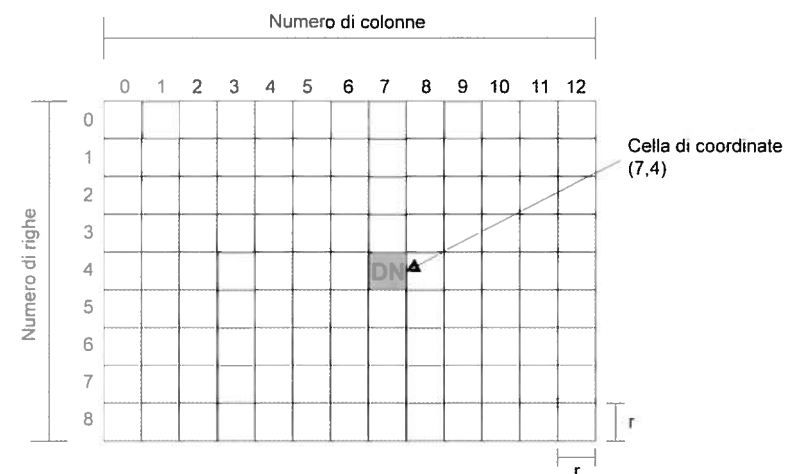


Figura 3.1. Struttura di un'immagine digitale



zato dalla dimensione in metri a terra dei suoi due lati, o quasi sempre, di quella di uno solo di essi, essendo la cella di forma quadrata. Essa, come visto nel capitolo precedente, viene definita *risoluzione spaziale* o *geometrica* dell'immagine e rappresenta la dimensione minima al suolo risolvibile ( $r$ ). Ciò sta a significare che la radiazione riflessa/emessa da oggetti più piccoli della risoluzione spaziale sarà mescolata assieme alla radiazione degli oggetti circostanti e quindi, in pratica, l'oggetto stesso non sarà riconoscibile. In realtà, anche gli oggetti di dimensioni pari alla risoluzione spaziale non saranno riconoscibili, ma occorreranno dimensioni maggiori, almeno quattro, cinque volte più grandi. Per esempio, se si considera un'automobile lunga quattro metri e larga due, essa sarà riconoscibile in immagini con risoluzione spaziale maggiore o uguale a un metro. Per pixel maggiori di un metro (e minori o uguali a quattro), si potrà sicuramente riconoscere la radiazione riflessa dall'automobile ma non la sua forma.

Da un punto di vista radiometrico, ogni pixel dell'immagine è caratterizzato da un *digital number*. Esso, come accennato sopra, viene attribuito alla cella come valore discreto (è un numero intero) rappresentante la radianza rilevata dal sensore. Questi valori di radianza sono ricampionati dal sensore a un certo numero di bit. Questo sta a significare che la discretizzazione della radianza avviene utilizzando una certa scala di valori basata sulle potenze di due. Per esempio, il ricampionamento a 8 bit ridistribuisce i valori di radianza fra 0 e 255, cioè su una scala di 256 valori interi che corrispondono infatti a  $2^8$ . Quello che tuttavia viene mostrato non è una matrice di numeri, ma un'immagine in toni di grigio (figura 3.2). Infatti, a ciascun valore della scala numerica viene assegnato un tono di grigio, dal nero (corrispondente a 0) al bianco (255): questo significa che i valori bassi di radianza saranno corrispondenti a toni scuri, mentre i valori alti a toni chiari.

È intuitivo dedurre che maggiore è il numero di bit a cui viene effettuato il campionamento, maggiore sarà la cosiddetta *dinamica* (ossia la gamma) di valori di grigio, con la conseguenza che oggetti con valori di radianza simile saranno più

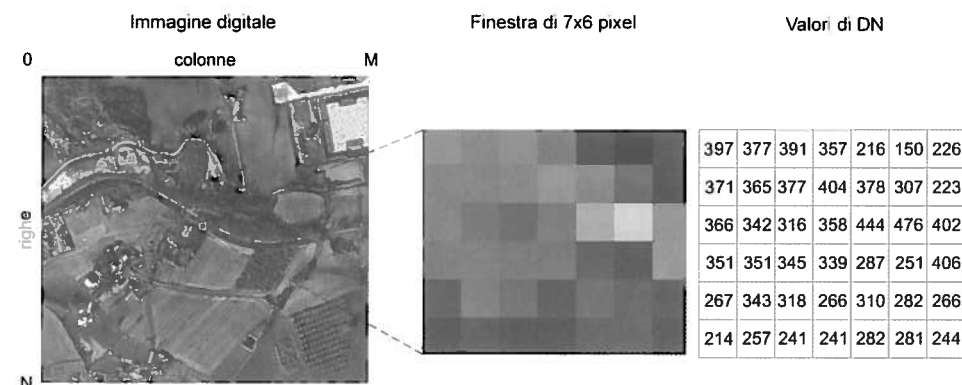


Figura 3.2. Immagine digitale e matrice di DN (campionamento a 16 bit)

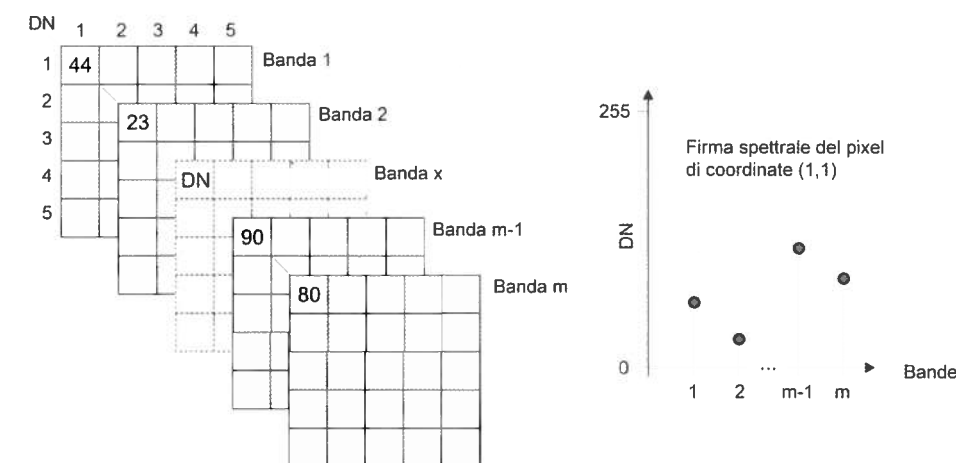


Figura 3.3. Bande e firma spettrale

facilmente discriminabili. Questo concetto sta alla base della risoluzione radiometrica. In base a ciò, un'immagine a un bit è solo bianca o nera, permettendo la distinzione di sole due classi di oggetti; a quattro bit sono 16 i livelli di grigio e quindi aumentano le classi di oggetti discriminabili; a 8 bit i livelli di grigio salgono a 256 e cresce anche la possibilità di separare oggetti con valori di radianza vicini. Attualmente, solo i sensori ad altissima risoluzione spaziale generano immagini campionate a più di 8 bit e precisamente da 10 a 16 bit. In quest'ultimo caso, il numero di livelli di grigio è  $2^{16}$ , cioè 65536.

Un'altra importante caratteristica delle immagini telerilevate è la loro risoluzione spettrale, ovvero l'intervallo di lunghezza d'onda a cui si riferisce la radianza che i suoi *digital number* rappresentano. Ogni scena può essere ripresa in diversi di questi intervalli di lunghezze d'onda o bande e quindi, per una medesima ripresa, possono essere disponibili più immagini, ognuna facente riferimento a una specifica banda. Come si può osservare in figura 3.3, ogni scena può possedere  $m$  immagini corrispondenti a  $m$  bande e quindi il pixel di coordinate  $(x,y)$  possiederà  $m$  *digital number* diversi a seconda della banda spettrale. L'insieme dei *digital number* rappresentati rispetto alle bande fornisce la firma spettrale del pixel di coordinate  $(x,y)$ .

### 3.1.2. L'istogramma e lo scatterogramma

L'istogramma di frequenza (figura 3.4) è lo strumento più semplice ma più efficace per l'analisi della distribuzione dei valori di DN di un'immagine telerilevata. L'istogramma di un'immagine è una funzione di distribuzione che fornisce per ogni *digital number* il numero di pixel che assumono quel valore. Sulle ascisse sono rappresentati i valori di DN, da 0 al valore massimo dipendente dal numero

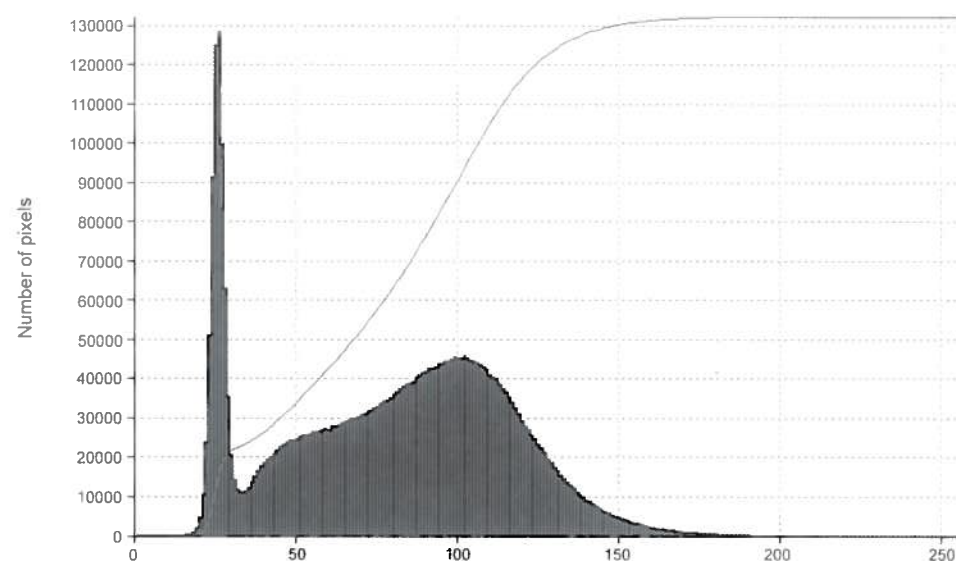


Figura 3.4. Istogramma

di bit a cui è campionata l'immagine; sulle ordinate è invece rappresentata la frequenza assoluta (numero di pixel) o percentuale di pixel per ogni valore.

L'istogramma caratterizza l'immagine solo da un punto statistico e non fornisce informazioni sulla distribuzione spaziale dei *digital number*. In sostanza, due immagini completamente diverse potrebbero avere il medesimo istogramma.

L'istogramma di un'immagine è un valido strumento per capire, a grandi linee, quanti tipi di superfici sono presenti nella scena, quanto la scena sia luminosa o contrastata, ecc. Lo studio dell'istogramma di un'immagine è infatti particolarmente utile quando si devono effettuare quelle elaborazioni, conosciute genericamente come *miglioramento del contrasto* o, in gergo, *contrast stretching* e che saranno trattate in dettaglio più avanti in questo capitolo.

Si considerino, ad esempio, le immagini nella figura 3.5. La prima in alto rappresenta una zona del centro Italia, fra Lazio e Abruzzo, caratterizzata da zone agricole, zone a vegetazione naturale e zone di suolo e roccia nuda, con alcuni centri urbani sparsi. A destra, il suo istogramma è costituito da una singola campana (o curva gaussiana) e per questo viene definito *unimodale*.

L'immagine in basso mostra invece un'area della Sardegna occidentale, presso Oristano. Oltre a diffuse zone agricole, zone a vegetazione naturale e a centri urbani, è presente anche una porzione di mare (area di colore nero). In questo caso, sono presenti quindi due famiglie di superfici nettamente diverse: terraferma e acqua. L'istogramma, a destra, è caratterizzato da due campane con picchi separati, una più a sinistra, stretta, localizzata su valori bassi di DN e una a destra, più ampia e su valori di DN maggiori. L'istogramma viene in questo caso definito

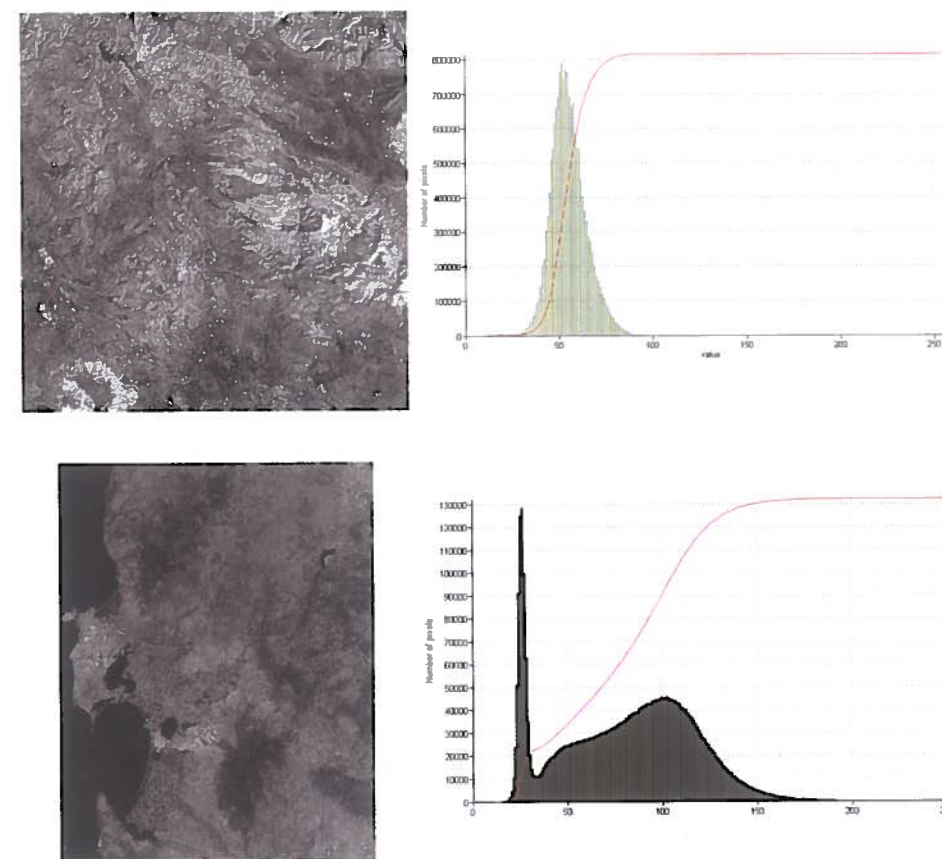


Figura 3.5. Istogramma mono a) e bimodale b)

*bimodale*. La campana di sinistra è quella che rappresenta i pixel di acqua, aventi valori di radianza bassi (si tratta evidentemente di un'immagine nell'infrarosso vicino), mentre la campana di destra rappresenta i pixel di terraferma, con una distribuzione di valori di radianza più varia (i tipi di superficie presenti sono diversi: vegetazione, suolo nudo, urbano, ecc.), ma generalmente maggiore rispetto all'acqua.

Raramente però gli istogrammi delle immagini sono distribuiti sull'intera gamma di valori disponibili per un certo numero di bit dal minimo al massimo. È infatti molto frequente che un'immagine possieda nativamente istogrammi molto compressi (vedere figura 3.5a). Questo comporta che l'intera distribuzione dei pixel sia rappresentata con pochi livelli di grigio e che quindi l'immagine abbia un basso contrasto e, proprio per questo motivo, è necessario eseguire elaborazioni di miglioramento del contrasto, come si vedrà più avanti.

Poiché nel telerilevamento si ha a che fare normalmente con immagini multi-banda, cioè caratterizzate da più canali spettrali, è necessario spesso utilizzare

uno strumento che sia in grado di confrontare la distribuzione dei valori di DN su più bande contemporaneamente. L'istogramma infatti è in grado di mostrare la distribuzione relativa a una singola banda spettrale. Per questo scopo, estendendo le statistiche di un'immagine su  $m$  dimensioni (corrispondenti alle  $m$  bande spettrali), il DN diventa un vettore a  $m$  componenti e l'insieme di tutti i DN dà origine al cosiddetto *scatterogramma*. Esso è rappresentato da una nube di punti nello spazio  $m$ -dimensionale che rappresenta la distribuzione dei DN dell'immagine nell'insieme delle sue bande. Per semplicità di rappresentazione e lettura, gli scatterogrammi sono comunemente limitati a due dimensioni nelle quali sono messe a confronto altrettante bande di un'immagine. Sull'asse delle ascisse è rappresentata la dinamica dei valori di DN della prima banda e sull'asse delle ordinate quella della seconda (figura 3.6). Lo spazio in cui è rappresentata la distribuzione statistica dei DN di un'immagine è anche definito *spazio spettrale* o *spazio delle caratteristiche* (dall'inglese *feature space*; si veda capitolo 4), per distinguerlo dallo spazio dell'immagine. In questo infatti è possibile stabilire delle relazioni spaziali fra DN di pixel diversi, mentre nello spazio spettrale ciò non è possibile.

Lo scatterogramma è uno strumento che serve a determinare la separabilità spettrale di singoli oggetti presenti nella scena osservata. Ogni classe di oggetto, caratterizzata da ben precise firme spettrali (boschi, acqua, suolo nudo, ecc.), tenderà a formare nello scatterogramma una nube o *cluster*, rappresentante la distribuzione di *digital number* di tutti i pixel di quella classe nelle due bande considerate (figura 3.7). Se i *cluster* sono ben separati, allora le due classi sono ben distinte nelle due bande, mentre se i *cluster* sono parzialmente sovrapposti o, peggio, completamente sovrapposti, la separabilità degli oggetti appartenenti alle due classi sarà parziale o nulla. Naturalmente, va detto che oggetti parzialmente o per niente separabili in due bande potrebbero es-

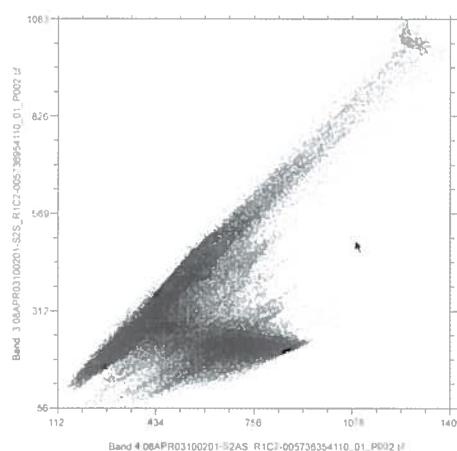


Figura 3.6. Esempio di scatterogramma bidimensionale

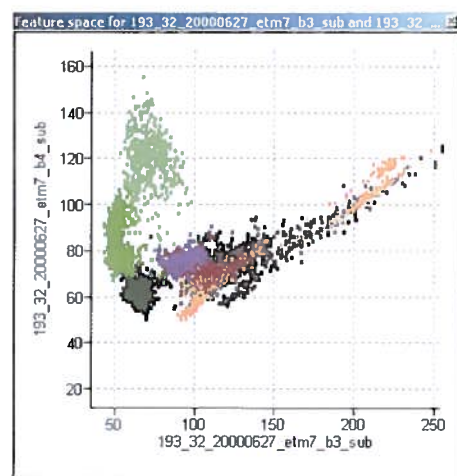


Figura 3.7. Scatterogramma con nubi rappresentanti diverse classi di copertura del suolo

serlo in altre due. Due bande in cui le superfici rappresentate sono difficilmente separabili sono dette altamente *correlate*. Questo significa che l'informazione che forniscono è molto simile. Lo scatterogramma è pertanto anche utilizzato per valutare il grado di correlazione fra bande diverse.

L'analisi dello scatterogramma e, di conseguenza, della correlazione delle bande è di grande utilità per il processo di classificazione delle immagini telerilevate, che verrà affrontato nel capitolo 4.

### 3.1.3. Brevi cenni sulla teoria dei colori

La conoscenza delle teorie dei colori assume grande importanza nel telerilevamento soprattutto per l'interpretazione delle composizioni a colori delle immagini multispettrali. Fra le varie teorie esistenti, quella maggiormente usata è la cosiddetta *teoria additiva*. Essa stabilisce che qualunque colore dell'iride si ottiene attraverso la somma di quantità diverse di ciascuno dei tre colori fondamentali: il rosso, il verde e il blu. Spesso questi ultimi sono abbreviati con l'iniziale inglese R (Red), G (Green), B (Blue), da cui deriva il nome del modello cromatico RGB. Secondo la teoria additiva, si può costruire un cubo (vedere figura 3.8), definito appunto *cubo RGB*, dove l'origine si trova a un vertice corrispondente al nero

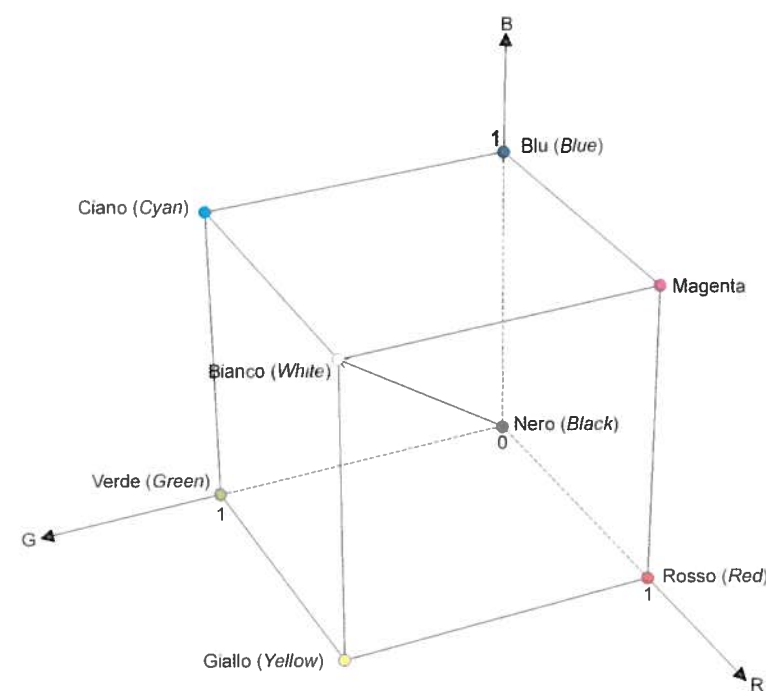


Figura 3.8. Il cubo RGB



(non-colore). Da questa origine si dipartono tre assi, corrispondenti a tre lati del cubo, rispettivamente l'asse nero-rosso, nero-verde e nero-blu. Quindi i tre colori fondamentali si trovano a tre degli otto vertici del cubo. Sugli assi suddetti si trovano toni di rosso, verde e blu che vanno dal nero al colore pieno. Opposto al vertice del nero, lungo la diagonale del cubo, sta il vertice del bianco, che quindi corrisponde alla somma dei tre colori fondamentali. Ai rimanenti tre vertici si trovano i colori cosiddetti *complementari*: giallo, magenta e ciano (questi ultimi due corrispondenti a un rosa acceso e a un celeste chiaro), dati dalla composizione rispettivamente del rosso con il verde, del rosso con il blu e del verde con il blu. Infine, sulla diagonale congiungente il nero con il bianco si trovano gradazioni di grigio dal più scuro al più chiaro.

Il cubo RGB è quindi un modello mediante il quale è possibile ricreare qualunque colore: per esempio, se si volesse ottenere un arancio, si dovrebbe comporre un rosso pieno (vertice R figura 3.8) con un quarto di verde, senza nessun contributo dal blu (questi esercizi si possono fare molto semplicemente con il programma Windows, Paint). Un grigio chiaro può essere ottenuto componendo in uguali proporzioni tre quarti di rosso, tre quarti di verde e tre quarti di blu.

Il modello RGB è particolarmente diffuso anche perché, da studi fatti sull'occhio umano, sembra che venga utilizzato anche dal nostro sistema visivo per la percezione dei colori. Inoltre, è anche il modello usato dai monitor per computer e dalle televisioni a colori.

Un altro modello per la composizione dei colori è il modello HSB che sta per *Hue*, *Saturation* e *Brightness*, cioè tono, saturazione e luminosità (questo modello può essere anche indicato come *HSI* – *Hue*, *Saturation*, *Intensity* o *HSV*, dove *V* sta per *Value*).

Il *tono* corrisponde alla lunghezza d'onda dominante del colore osservato, può assumere nomi come rosso, verde, arancio, ecc., quindi virtualmente qualunque colore dello spettro del visibile. Il grado di purezza del colore è definito dalla saturazione, che si può anche spiegare come l'intensità del tono che quando è alta produce colori vividi e squillanti, mentre quando è bassa dà colori spenti verso il grigio. La luminosità è, infine, una misura della brillantezza del colore e tende a dare più chiarezza per valori alti, mentre porta a scurire il colore per valori bassi. Il modello HSB rappresenta i colori nello spazio attraverso una piramide a base esagonale con il vertice puntato verso il basso (figura 3.9). Sul vertice della piramide sta il nero, origine dei tre assi HSB. Lungo l'asse della piramide si trova la luminosità (aumentando questa si passa dal nero al bianco attraverso livelli di grigio), sui vertici dell'esagono di base stanno i sei toni principali: rosso, giallo, verde, ciano, blu e magenta, ordinati secondo le loro lunghezze d'onda, mentre sulla base della piramide, dal centro verso i lati, è calcolata la saturazione. Se-

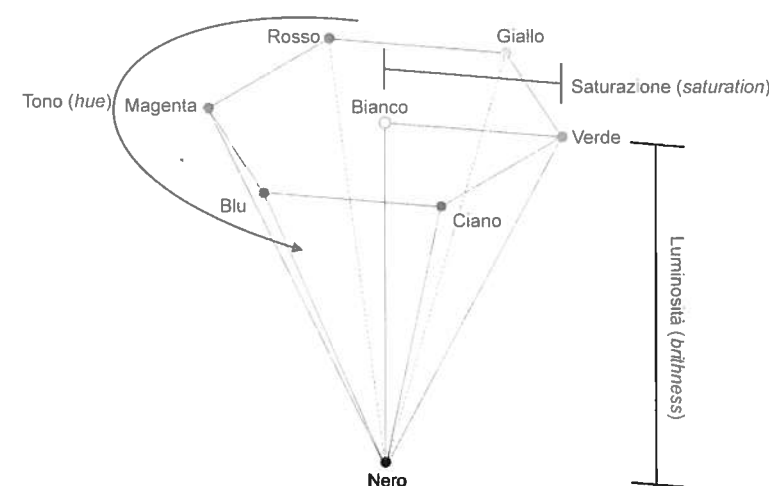


Figura 3.9. La piramide HSB

condo il modello HSB, il colore arancio dell'esempio precedente si trova sul lato dell'esagono fra rosso e giallo.

### 3.1.4. Le composizioni a veri e falsi colori

La teoria dei colori risulta di grande utilità nel campo del telerilevamento poiché il più delle volte le immagini con cui si ha a che fare sono multispettrali e possiedono quindi più bande. Normalmente una singola banda viene visualizzata utilizzando una scala di grigi per la gamma dei valori di *digital number*. Il numero di livelli di grigio, come si è detto in precedenza, è dato dal campionamento dell'immagine stessa.

Molto spesso però risulta utile combinare più bande assieme, per aumentare la quantità di informazione simultaneamente analizzabile. Dal momento che il modello di composizione dei colori più utilizzato è quello RGB, il numero di bande combinabili assieme è tre, a ognuna delle quali viene assegnato uno dei colori fondamentali. Si prendano per esempio le tre bande X, Y e Z. Se si realizza una composizione a colori RGB delle bande X, Y e Z, vuol dire che si assegnerà alla banda X il colore fondamentale rosso, alla banda Y il verde e alla Z il blu. Assegnare a una banda un colore fondamentale significa che i suoi pixel, invece di avere i valori di DN rappresentati in toni di grigio, li avrà in toni del colore fondamentale, dal nero al colore pieno. In sostanza, ricordando il cubo RGB, la scala cromatica di ciascuna banda corrisponderà a ciascuno degli assi principali del cubo.

Quando si combinano insieme le tre bande colorate in RGB, i tre *digital number* di un determinato pixel si sommeranno assieme per generare il colore visualizzato nell'immagine composta. Quindi, sempre facendo un esempio, se un pixel ha va-

lori molto alti di DN in tutte e tre le bande, nella composizione esso assumerà un colore prossimo al bianco. Se invece ha valori di DN alti nella banda colorata in rosso e bassi nelle altre due bande, esso, nella composizione tenderà ad avere un colore rosso. Se, infine, i DN di due bande rappresentate rispettivamente in blu e verde avranno valori più alti rispetto a quello della banda rappresentata in rosso, il colore risultante visibile sull'immagine sarà quello dato dalla composizione di blu e verde e quindi ciano.

La comprensione di questo meccanismo di composizione dei colori è di fondamentale importanza per saper leggere le immagini telerilevate. I colori, infatti, possono fornire preziose informazioni sugli elementi del territorio e le loro condizioni. Ad esempio, si considerino tre bande spettrali: una banda nell'infrarosso vicino (NIR), una nell'infrarosso medio (MIR) e una nel rosso (R). Si assegnino a queste bande i tre colori fondamentali rispettivamente R, G e B. La vegetazione presenta un'alta riflettanza nell'infrarosso vicino, molto bassa nel rosso e variabile nell'infrarosso medio a seconda del contenuto d'acqua (più alta se povera d'acqua). Se si suppone che la vegetazione sia sana, quindi con acqua in abbondanza, per ricavare il suo colore nella composizione siffatta, basta fare il seguente ragionamento: il colore rosso assumerà valori molto alti, mentre il verde e il blu saranno molto bassi. Di conseguenza la vegetazione apparirà rossa. Se invece le piante nell'immagine in questione soffrissero di stress idrico, si avrebbero alti valori di riflettanza nel NIR ma anche alti valori nel MIR. Nella zona spettrale del rosso, invece, i valori sarebbero comunque bassi. La vegetazione apparirebbe quindi di un colore dato dalla combinazione di rosso e verde, corrispondente a vari toni dall'arancio al giallo a seconda del livello di stress.

Una comoda procedura per la lettura delle immagini multispettrali rappresentate in composizioni RGB è la seguente:

- analizzare il colore visibile sull'immagine e determinare la sua composizione in termini di colori fondamentali: questo porterà a fare una valutazione su quali siano quelli che portano il maggior contributo;
- associando a ciascun colore fondamentale la corrispondente banda, convertire il contributo cromatico in contributo spettrale, arrivando a stabilire la regione dello spettro in cui la superficie sotto indagine risponde maggiormente;
- confrontare la risposta risultante dal passaggio precedente con le firme spettrali delle principali superfici in modo da poter assegnare un nome alla superficie osservata.

Naturalmente questa procedura deve essere supportata da altri elementi, quali il contesto generale dell'immagine, la tessitura, la geometria, che sono fondamenti della fotointerpretazione e che saranno trattati nel secondo volume di *L'osservazione della Terra – Fotointerpretazione*.

Le composizioni a colori sono chiamate comunemente con il termine inglese *color composite*. Giacché spesso i colori rappresentati non sono quelli reali degli

oggetti presenti sulla superficie terrestre (basta considerare l'esempio precedente: le piante non sono rosse), si usa parlare di *composizioni a falsi colori* o *false color composites* (FCC).

Esiste tuttavia un caso particolare in cui si parla di *composizione a veri colori* (*True Color Compositè*). Considerando le tre bande spettrali centrate nella regione del visibile, rispettivamente sulla zona del rosso, del verde e del blu, se si compongono queste tre bande in un *color composite* RGB, ogni banda sarà colorata come effettivamente appare in realtà (all'occhio umano) e quindi si otterrà un'immagine a veri colori, in tutto e per tutto simile a una fotografia a colori.

### 3.2. Pre-elaborazioni: correzioni geometriche e radiometriche

#### 3.2.1. Cenni introduttivi

Le immagini telerilevate trasmesse dal sensore alla stazione ricevente contengono errori di vario tipo e quindi possono essere considerate memorizzate in un formato per così dire "grezzo". Per questo motivo non possono essere direttamente adoperate dall'utente finale per elaborazioni, fotointerpretazione e integrazione con altri dati geografici in un GIS. È necessario effettuare una serie di operazioni che consistono in correzioni di due tipi: radiometriche e geometriche. Tutti i trattamenti che vengono effettuati per preparare le immagini all'uso da parte dell'utente finale sono chiamati *pre-elaborazioni*.

In generale, molte di queste correzioni vengono effettuate dalle stazioni a terra che ricevono i dati dai satelliti e dalle compagnie che si occupano della distribuzione e/o commercializzazione delle immagini, prima che il dato telerilevato venga fornito agli utenti finali. Su richiesta, è possibile anche ottenere l'intera gamma delle pre-elaborazioni, fra cui anche l'ortorettifica, ossia la correzione geometrica che permette una piena coerenza dell'immagine con la cartografia, in modo da poterla integrare immediatamente con gli altri dati geografici disponibili. Evidentemente, il costo dell'immagine aumenta al crescere del numero di pre-elaborazioni richieste.

Nel paragrafo 3.2.2 saranno descritte le correzioni di tipo radiometrico, mentre nel paragrafo 3.2.3, ci si occuperà di quelle geometriche.

#### 3.2.2. Gli errori radiometrici e la loro correzione

I sensori possono essere soggetti a errori *radiometrici* che influenzano la loro capacità di rilevare esattamente l'energia riflessa dalla superficie terrestre. Questo fa sì che il *digital number* correlato a un determinato pixel quasi sempre non rappresenti correttamente il valore di radianza associato alla porzione di superficie terrestre racchiusa nell'area del pixel stesso. In sostanza, si può dire che ciò che

il sensore registra non è la vera radianza ma un valore alterato. Questi errori sono di solito dovuti a due fattori di disturbo:

- malfunzionamento del sensore;
- effetti di disturbo dell'atmosfera.

Il primo fattore dipende dalle caratteristiche intrinseche dello strumento. Prima del lancio in orbita del sensore, i vari rilevatori sono calibrati attentamente affinché registrino correttamente la radianza, ma accade, di norma, che lo strumento, durante la sua esistenza, vada incontro a cambiamenti nella capacità di registrare la radiazione proveniente dalla Terra che, di solito, comportano un peggioramento della risposta. Questo fatto può far sì che in immagini acquisite in anni diversi, da un ipotetico pixel che riflette la stessa energia nel tempo (al netto delle condizioni atmosferiche), sia misurata una diversa quantità di radianza. In questo caso, affinché immagini di periodi diversi siano confrontabili, deve essere eseguita una correzione dell'errore, mediante un'operazione chiamata *calibrazione*. Essa consiste in un algoritmo, specifico per ciascun sensore che, tenendo conto di coefficienti di degradazione della capacità di ricevere la radiazione elettromagnetica, corregge il valore di radianza misurato al sensore nel valore effettivo. Quest'ultimo viene poi codificato in base a un certo numero di bit in un *digital number* calibrato ( $Q_{cal}$ ) prima di essere distribuito all'utente finale.

A partire dal  $Q_{cal}$  è quindi possibile risalire mediante formule note al valore corretto della radianza misurata al sensore, operazione che sarà effettuata nella parte pratica di questo testo al capitolo 8. La trasformazione da *digital number* calibrati a radianza risulta particolarmente utile quando si vogliano confrontare immagini acquisite da sensori di tipo diverso o dallo stesso sensore in momenti diversi (stagioni o anni) oppure per utilizzare i valori di radianza in modelli fisici. Essendo però la radianza una grandezza misurata alla quota di volo della piattaforma che ospita il sensore, ossia al di sopra degli strati più densi dell'atmosfera, per confrontare efficacemente due immagini è necessario prendere in considerazione ed eliminare gli effetti di disturbo di quest'ultima.

A causa dell'effetto assorbente e dispersivo dell'atmosfera, un'immagine telerilevata mostra valori di radianza alterati, che si traducono di solito in un basso contrasto con effetto "foschia" (dovuto proprio alla diffusione della radiazione). Questo è tanto più evidente quanto si va verso bande spettrali nella regione del visibile e specialmente del blu, dove la diffusione è massima.

Esistono numerose metodologie che possono essere usate per correggere questo effetto e sono divise in due categorie:

- su base modellistica (*model-based*);
- sulla base dell'immagine (*image-based*).

I metodi *model-based*, usando modelli fisici dell'atmosfera, ottengono i risultati

migliori e sono i più rigorosi da un punto di vista scientifico, ma sono estremamente complessi e necessitano di moltissimi parametri atmosferici, spesso da misurare direttamente in situ in concomitanza con il passaggio del satellite. Un esempio è il MODTRAN ([www.modtran.org](http://www.modtran.org)).

Molto più abordabili sono i metodi *image-based*, che sono implementati a partire dai soli dati presenti nell'immagine. Il più diffuso di questi (Chavez P., 1988) è il cosiddetto dos (*Dark Object Subtraction*) con le sue versioni modificate, fra cui il cost (Chavez P., 1996). In questa procedura, si assume che, dall'oggetto più scuro presente nell'immagine da correggere, il sensore, in assenza di atmosfera, registrerebbe una radianza nulla (spesso questo oggetto è un corpo d'acqua profonda, asfalto appena posato, un'area in ombra, ecc.). Dal momento che dall'oggetto in questione viene in realtà registrato un valore non nullo di radianza, quest'ultimo viene considerato come l'effetto di diffusione atmosferica generale. Attraverso la sottrazione di tale valore da quello di tutti i pixel dell'immagine, se ne ottiene una nuova priva dell'effetto di disturbo dell'atmosfera. Questa procedura viene anche chiamata *riduzione della foschia* (*haze reduction*).

È doveroso fare delle considerazioni riguardo alla correzione atmosferica: questa prevede algoritmi piuttosto complessi, molto più di quanto si possa desumere dalla breve trattazione esposta precedentemente, per i quali sono spesso necessari parametri difficili da reperire. È opportuno quindi valutare se effettivamente ci sia o meno la necessità di implementare questa correzione. In particolare, si possono distinguere due situazioni:

- l'immagine telerilevata viene usata per un comune uso di fotointerpretazione;
- l'immagine viene utilizzata per analisi quantitative sui reali valori di radianza dei pixel e più precisamente:
  - si vogliono correlare tali valori a proprietà fisiche degli oggetti presenti sulla superficie terrestre;
  - si confrontano valori di radianza di pixel in differenti bande spettrali in cui è diverso l'effetto perturbativo;
  - si effettuano analisi multi-temporali, ossia quegli studi che prevedono il confronto di immagini riprese in momenti diversi, come stagioni o anni diversi.

Nel primo caso, data la natura qualitativa dell'analisi che si effettua, la correzione atmosferica non è necessaria: l'immagine risulta sufficientemente chiara per essere interpretata così com'è. Nel secondo caso, invece, l'effetto atmosferico deve essere assolutamente eliminato per garantire la massima correttezza delle analisi.

### 3.2.3. Le distorsioni geometriche e la loro correzione

Le distorsioni geometriche che caratterizzano le immagini acquisite dai sensori per telerilevamento possono essere di gran lunga più numerose rispetto agli errori di tipo radiometrico e sono dovute a una serie di fattori, fra cui:



- la rotazione della Terra durante la registrazione dell'immagine;
- la curvatura della Terra;
- variazioni di assetto e quota della piattaforma che ospita il sensore lungo la sua orbita;
- altre caratteristiche e problemi intrinseci al sensore stesso.

Al fine di correggere le distorsioni geometriche, possono essere seguite due strade:

- definire, attraverso un modello matematico, la natura delle distorsioni e applicare formule correttive; questo è possibile quando l'entità e le caratteristiche degli errori geometrici sono note, come ad esempio nel caso della distorsione dovuta all'effetto rotatorio terrestre;
- stabilire una corrispondenza matematica fra la posizione dei pixel dell'immagine e le coordinate sulla superficie terrestre dei punti che quei pixel rappresentano; questo secondo metodo può essere applicato per correggere in generale la geometria dell'immagine, senza avere alcuna conoscenza della causa e del tipo di errore.

Grazie alla maggiore semplicità di applicazione e al suo effetto generale sull'insieme delle distorsioni geometriche, il secondo metodo è di gran lunga il più utilizzato. Esso viene solitamente definito con termini diversi, a seconda dello scopo e del risultato raggiunto. Si parla di:

- *registrazione*, quando si fa corrispondere geometricamente una immagine a un'altra già corretta;
- *georeferenziazione* (o anche *rettifica*), quando si stabilisce la corrispondenza fra l'immagine e una carta (di solito topografica), in modo che l'immagine assuma le proprietà planimetriche della rappresentazione cartografica;
- *ortorettifica*, quando la correzione geometrica, oltre a prevedere la georeferenziazione, corregge le distorsioni dell'immagine dovute all'altimetria.

Tutti e tre i metodi di correzione sopra elencati prevedono una procedura base comune, consistente in quattro passaggi:

- definizione del sistema geodetico-cartografico;
- scelta di una funzione matematica per l'aggiustamento della distorsione (funzione di trasformazione o mappatura);
- associazione tra coppie di coordinate immagine e coppie di coordinate terreno;
- ricampionamento.

L'ortorettifica, inoltre, ha bisogno di un dato aggiuntivo in input rappresentato dal modello digitale del terreno (DTM), indispensabile per effettuare la correzione della distorsione topografica.

Il concetto fondamentale di questo sistema di correzione è che, se si può individuare sull'immagine distorta un certo numero di pixel con coordinate locali  $x_i, y_i$

(esprese in termini di colonne e righe) di cui sono note le coordinate a terra  $X_i, Y_i$  (in un dato sistema di riferimento geodetico-cartografico), allora, attraverso una funzione matematica di mappatura, è possibile assegnare a tutti i pixel dell'immagine le coordinate terreno e, attraverso un'operazione di ricampionamento, definire una nuova immagine geometricamente corretta.

I pixel individuati sull'immagine, di cui sono note le coordinate a terra, prendono il nome di *ground control point* (GCP). La conoscenza delle loro coordinate terreno può derivare da cartografia esistente, da rilievi GPS o da immagini telerilevate già corrette, definite in generale *fonti di riferimento*.

### 3.2.3.1. Definizione del sistema geodetico-cartografico

Il primo passaggio nella procedura è la definizione del sistema geodetico-cartografico al quale verrà riferita l'immagine da correggere. Questo sistema dovrà essere quello in cui è proiettata la fonte di riferimento e sarà composto da una serie di parametri quali datum, ellissoide, meridiano centrale, tipo di rappresentazione cartografica, ecc.

Di solito le operazioni di correzione geometrica sono gestite da software appositi o da moduli specifici all'interno di pacchetti più generalmente dedicati al trattamento di immagini. Questo fa sì che i parametri suddetti siano già pre-impostati e quindi si debba soltanto scegliere il sistema di riferimento da una lista.



Figura 3.10. Localizzazione di un GCP sull'immagine e sul documento di riferimento

### 3.2.3.2. I GCP

Un *ground control point* è un pixel rappresentante un elemento presente sulla superficie terrestre facilmente riconoscibile sia sull'immagine distorta sia sulla fonte di riferimento. Un aspetto essenziale della scelta dei GCP è che questi devono rappresentare elementi del territorio ben identificabili, in quanto un posizionamento impreciso del punto comporterebbe un'errata associazione fra coordinate immagine e coordinate terreno, compromettendo la correzione geometrica. Ad esempio, un tipico GCP potrebbe essere costituito da un incrocio stradale che deve essere individuato inequivocabilmente sull'immagine e su un documento di riferimento, quale una carta topografica, un'altra immagine telerilevata corretta geometricamente o in campo se si acquisiscono le sue coordinate mediante GPS. Dalla fonte di riferimento saranno conseguentemente ricavate le coordinate terreno (si veda figura 3.10).

Riguardo ai criteri di scelta e posizionamento dei GCP, in generale vale il principio

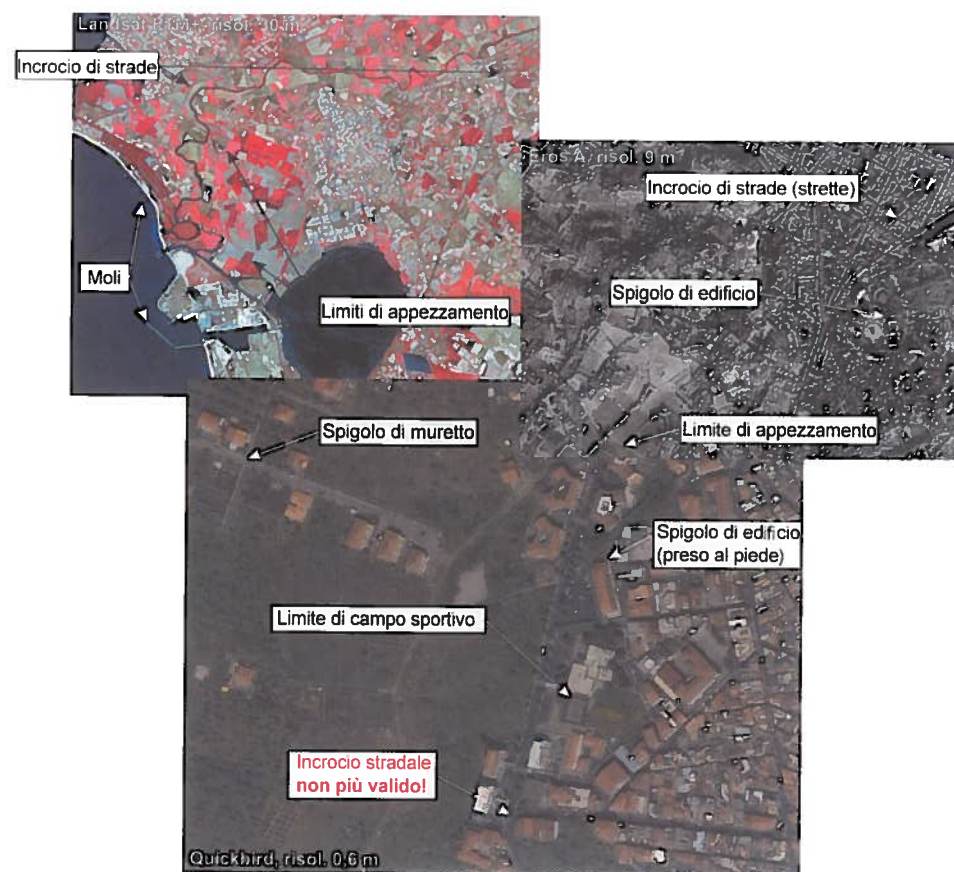


Figura 3.11. Esempi di gcp su immagini a diversa risoluzione spaziale

secondo cui gli elementi che serviranno da GCP devono essere ben riconoscibili. In tal caso, la scelta migliore è rappresentata da tutte quelle entità di forma definita, ben contrastate rispetto allo sfondo dell'immagine e soprattutto la cui posizione rimane ragionevolmente fissa nel tempo. Elementi di questo tipo sono abbondanti in regioni della Terra densamente antropizzate, essendo costituiti da (figura 3.11):

- intersezione fra vie di comunicazione come strade, sentieri, ferrovie;
- edifici o strutture isolate;
- altri elementi di tipo antropico di forma geometrica regolare (limiti di appezzamenti agricoli).

Con i sensori di ultima generazione, la cui risoluzione spaziale scende fino a mezzo metro, alcuni degli elementi suddetti devono essere reconsiderati, mentre altri se ne aggiungeranno. Ad esempio, un GCP potrà essere rappresentato non tanto da un edificio, ma da un suo spigolo (considerato al piede, naturalmente e non al tetto). Inoltre, potranno essere considerati potenziali GCP anche la segnaletica orizzontale delle strade, alberi isolati, muri di cinta, ecc., che in immagini a risoluzione più bassa non erano discriminabili.

È sempre meglio evitare invece tutti quegli elementi potenzialmente soggetti a

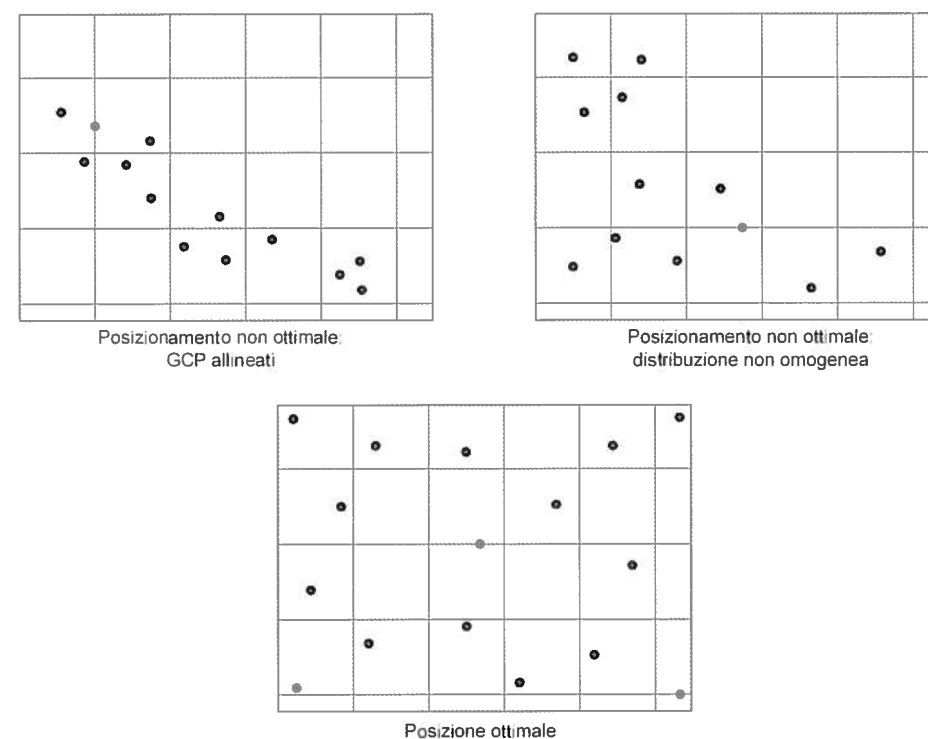


Figura 3.12. Criteri di posizionamento dei GCP e frequenti errori

mutazioni nel tempo, poiché quello che si osserva su di un'immagine acquisita in un certo momento, potrebbe essere stato diverso al tempo della realizzazione della cartografia o dell'acquisizione dell'immagine di riferimento:

- tratti naturali di fiumi come anse, isolette e meandri;
- porzioni naturali della linea di costa (specialmente se costa bassa).

Per quanto riguarda il posizionamento dei *ground control point* sull'immagine, esso è estremamente importante, poiché influenza il risultato della correzione geometrica. La funzione di mappatura, infatti, per calcolare le coordinate di tutti i pixel a partire dai GCP, effettua un'operazione di interpolazione. Affinché questa sia il più efficace possibile, è necessario che i punti di controllo siano disposti con la massima omogeneità e la massima copertura dell'area di interesse. Per seguire questi due criteri, è opportuno di solito localizzare quattro GCP vicino ai vertici dell'immagine e poi infittire la distribuzione internamente cercando di ottenere una copertura il più omogenea possibile. La figura 3.12 mostra alcuni esempi di posizionamento di GCP, distinguendo fra criteri corretti e scorretti.

### 3.2.3.3. La funzione di trasformazione

Anche se non è questa la sede per esporre dettagliatamente le procedure matematiche che sono alla base del processo di correzione geometrica, a titolo divulgativo si daranno delle informazioni sul tipo di funzione e su ciò che è necessario impostare da parte dell'utente nella procedura.

La funzione di mappatura, che mette in relazione le coordinate *raster* e quelle *terreno* dei GCP, è un polinomio del tipo:

$$X = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{m-j} a_{jk} x^j y^k \quad (3.1)$$

$$Y = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{m-j} b_{jk} x^j y^k \quad (3.2)$$

dove

- $x, y$  = coordinate *raster* dei GCP (note)
- $X, Y$  = coordinate *terreno* dei GCP (note)
- $a_{jk}, b_{jk}$  = coefficienti della trasformazione (incognita)
- $m$  = grado della trasformazione (definito dall'utente).

I coefficienti della trasformazione (cioè le incognite) sono valutati a partire dai punti di controllo secondo un metodo statistico detto dei *minimi quadrati*. Altra incognita è l'ordine della trasformazione, che deve essere imposto dall'utente ed è un elemento di importanza cruciale.

Le trasformazioni comunemente utilizzate per le procedure di rettificazione hanno ordini  $m$  compresi fra 1 e 3. Per  $m = 1$  si ha una polinomiale di 1° ordine detta anche *lineare* o trasformazione *affine*, che consente di applicare una correzione geometrica attraverso una roto-traslazione rigida: è quindi usata prevalentemente per rettificare documenti di tipo cartografico oppure immagini telerilevate rappresentanti zone pianeggianti e di limitata estensione per le quali non sia significativa la curvatura della Terra. Per la maggior parte dei casi, invece, sono più efficaci le polinomiali di 2° ordine ( $m = 2$ ) che, oltre a produrre una roto-traslazione dell'immagine, comportano anche deformazioni nella stessa. Le trasformazioni dal 3° ordine in poi ( $m \geq 3$ ) sono spesso sconsigliate perché portano a forti deformazioni nell'immagine di uscita. Infatti, mentre per le polinomiali di primo e secondo ordine i valori delle coordinate dei pixel lontani dai GCP vengono approssimati in maniera accettabile, la polinomiale cubica tende a dare buoni risultati per pixel vicini ai GCP, ma genera errori significativi lontano da essi, comportando una forte distorsione dell'immagine.

L'ordine della funzione polinomiale condiziona, a livello teorico, anche il numero minimo ammissibile di GCP  $N_{gcp}$  per la correzione dell'immagine, che è dato da:

$$N_{gcp} = [(m+2)(m+1)]/2 \quad (3.3)$$

Per una polinomiale lineare si ha infatti un minimo di 3 GCP, per un secondo ordine i GCP salgono a 6, mentre sono 10 per una cubica. Tuttavia, anche in funzione della dimensione dell'immagine, per ottenere una trasformazione accettabile, potrebbe essere necessario un numero di gran lunga maggiore di GCP, spesso quantificabile in diverse decine. Ne consegue che le operazioni di selezione e acquisizione dei punti di controllo sono piuttosto dispendiose in termini di tempo e danaro.

### 3.2.3.4. Valutazione della trasformazione: l'errore quadratico medio

Per determinare se la trasformazione attraverso GCP è stata precisa o meno, viene usato un metodo di valutazione attraverso la cosiddetta *radice dell'errore quadratico medio*, anche chiamata in inglese *Root Mean Square Error* (abbreviato *RMSLE*). Questo metodo è comunemente utilizzato in statistica per indicare la discrepanza quadratica media fra i valori dei dati osservati e i valori dei dati stimati. Una volta stabilita la corrispondenza fra coordinate dell'immagine distorta e coordinate terreno, viene applicata per ciascun punto una funzione di mappatura cosiddetta *inversa*, in quanto ricalcola le coordinate terreno dei GCP a partire da quelle dell'immagine distorta e le confronta con quelle imposte dall'utente. Lo scarto fra i due valori viene chiamato *errore residuale* o *residuo* ( $r$ ) e, per ogni GCP, è calcolato sia sulle  $x$  che sulle  $y$  come segue:



$$r_x = x_{inv} - x_{gcp} \quad (3.4)$$

$$r_y = y_{inv} - y_{gcp} \quad (3.5)$$

dove

$x_{inv}$  e  $y_{inv}$  = coordinate ricalcolate con la funzione inversa

$x_{gcp}$  e  $y_{gcp}$  = coordinate imposte dall'utente.

L'accuratezza di posizionamento del singolo punto di controllo viene quindi valutata attraverso l'RMSE, dato da:

$$RMSE_{GCP} = \sqrt{(r_x)^2 + (r_y)^2} \quad (3.6)$$

L'accuratezza globale della trasformazione è invece determinata sommando gli RMSE di ogni singolo GCP e dividendo per il numero di essi  $n$ :

$$RMSE_{GLOB} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n RMSE_i^2}{n}} \quad (3.7)$$

Una regola pratica per ottenere buoni risultati nel processo di rettificazione è quella di mantenere sempre il valore dell'RMSE al di sotto della risoluzione spaziale dell'immagine. In questo modo, l'eventuale scostamento dei pixel dalla loro reale posizione risulta inferiore alla minima dimensione discriminabile. Se l'RMSE rimane troppo alto (ossia ben al di sopra della risoluzione spaziale), nonostante il posizionamento dei GCP sia accurato, si può tentare di ridurlo attraverso alcune metodologie:

- eliminare i punti dubbi: se ci sono dei GCP con errore residuale alto e sul cui posizionamento non si è sicuri, si può provare a escluderli dalla trasformazione. L'errore generale dovrebbe diminuire;

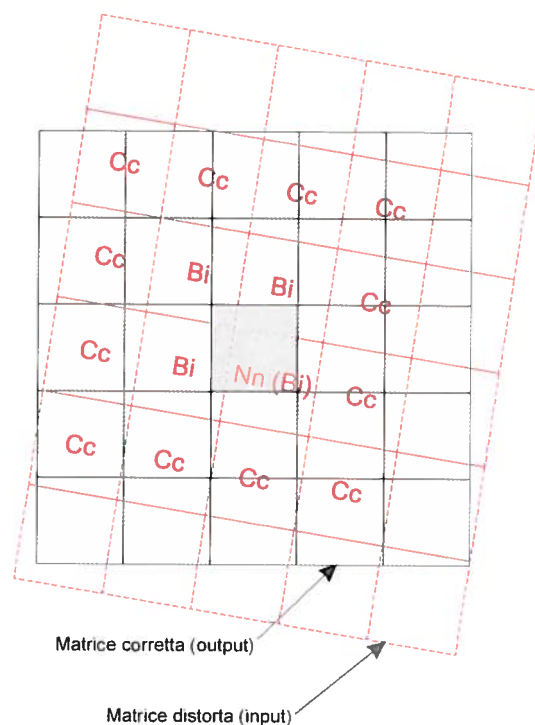


Figura 3.13. Matrice dell'immagine distorta sovrapposta alla matrice corretta geometricamente (fonte: Lillesand & Kiefer 1994, modificato)

- aggiungere altri punti: inserendo nuovi punti nelle zone che ne sono prive si aumenta l'accuratezza della trasformazione e l'RMSE può diminuire;
- usare una trasformazione di ordine superiore: ciò è raccomandabile essenzialmente se l'ordine a cui si passerebbe non è superiore al secondo, per i motivi esposti nelle precedenti pagine.

### 3.2.3.5. Il ricampionamento

Una volta definite le funzioni di mappatura e valutato accettabile l'RMSE, la fase successiva della correzione comprende la costruzione dell'immagine corretta geometricamente. Questo passo avviene in due fasi:

- viene creata una nuova matrice di pixel vuoti, ossia privi del valore di DN, ai cui vertici vengono imposte le nuove coordinate terreno corrette e del quale viene calcolato il numero di righe e colonne con le rispettive coordinate (figura 3.13);
- la matrice vuota viene "riempita" con i valori di DN ottenuti a partire dai valori dell'immagine distorta attraverso un metodo di interpolazione come di seguito descritto.

Per il ricampionamento delle immagini digitali vengono utilizzati tre diversi metodi di interpolazione. Essi sono:

- il metodo cosiddetto *nearest neighbour* (vicino più prossimo): il valore di uscita è assegnato in base al pixel più vicino che si trova nella matrice originale (pixel  $Nn$  in figura 3.13). Il principale vantaggio di questo metodo risiede nel fatto che nella matrice corretta il valore originale del DN del pixel non viene alterato. Ciò è molto utile quando si utilizza l'immagine per analisi quantitative, poiché se si volesse calcolare il valore della radianza effettiva a partire dal DN per l'immagine ricampionata, non si correrebbe il pericolo di utilizzare valori alterati. Per contro, le entità nell'immagine di uscita possono subire una leggera dislocazione spaziale. Questo può far sì che gli oggetti nell'immagine corretta appaiano deformati, rendendo l'interpretazione del documento meno fluida dell'originale;
- il metodo *bilinear interpolation* (interpolazione bilineare): il valore in uscita è un valore alterato assegnato sulla base della media pesata dei valori dei 4 pixel più vicini nella matrice originale (pixel  $Bi$  in figura 3.13). Ciò comporta dei vantaggi, fra cui quello che l'immagine ricampionata ha un'apparenza più omogenea e lo svantaggio che i valori originali dei DN dei pixel sono definitivamente alterati;
- il metodo *cubic convolution* (convoluzione cubica): il valore di uscita è un valore anch'esso alterato, assegnato sulla base dei 16 valori dei pixel più vicini nella matrice originale (pixel  $Cc$  in figura 3.13). Come per il *bilinear interpolation*, questo metodo rende l'immagine meglio leggibile rispetto al metodo *nearest neighbour*, aspetto utile soprattutto ai fini della fotointerpretazione. Fra l'altro il *cubic convolution* genera un'immagine più nitida rispetto al metodo *bilinear interpolation*.

D'altra parte, resta il problema della completa perdita dei valori originali di DN, che non può essere accettato in caso di uso quantitativo dell'immagine.

### 3.3. Il miglioramento delle immagini

#### 3.3.1. Gli scopi del miglioramento

Il termine *miglioramento* delle immagini sta a indicare una classe di elaborazioni che servono ad aumentare la leggibilità delle immagini stesse, incrementando la distinzione apparente fra le caratteristiche della scena. Questi trattamenti vengono eseguiti specialmente quando si deve preparare il dato per la fotointerpretazione. Il miglioramento d'immagine mira a combinare le capacità umane e informatiche: infatti, il sistema occhio-cervello è particolarmente abile a discernere le caratteristiche di una immagine, ma tende a essere meno efficace a discriminare piccole differenze a livello radiometrico o spettrale, come ad esempio due oggetti rappresentati da livelli di grigio molto simile. Il miglioramento effettuato tramite metodi informatici ha lo scopo di amplificare queste sottili differenze, per renderle immediatamente percepibili.

Le tecniche di miglioramento possono essere divise in due categorie, ciascuna suddivisibile in altre classi:

- tecniche di accentuazione del contrasto attraverso operatori puntuali:
  - *gray level thresholding* (soglie di toni di grigio);
  - *density o level slicing* (tecnica a isolivelli o a livelli di densità);
  - *contrast stretching* (stiramento del contrasto).
- metodi miglioramento delle caratteristiche spaziali attraverso operatori locali:
  - filtri di convoluzione.

#### 3.3.2. Il miglioramento mediante operatori puntuali

All'interno di un'immagine, un operatore puntuale si applica al DN di un pixel per ottenere in uscita un valore DN' modificato associato al medesimo pixel. In altre parole, gli operatori puntuali agiscono cella per cella senza alterare le relazioni esistenti fra di esse. Poiché influenzano solo l'aspetto radiometrico dell'immagine, le tecniche che utilizzano questo tipo di operatori vengono definite anche *tecniche di enfattizzazione radiometrica*.

##### 3.3.2.1. Grey level thresholding (soglia di toni di grigio)

La tecnica del *grey level thresholding* (soglia di toni di grigio) si usa per segmentare un'immagine in due classi, una per tutti i pixel aventi valori minori di un dato livello di grigio, l'altra per quelli aventi valori maggiori.

La soglia di toni di grigio può essere utile quando si separino due grandi superfici di un'immagine, tipo mare e terra. Alle due classi possono essere poi assegnati valori numerici costanti (per esempio uno o zero) e l'elaborazione può essere successivamente usata come maschera per ulteriori applicazioni. La scelta della soglia deve essere fatta analizzando attentamente l'istogramma dell'immagine.

##### 3.3.2.2. Level slicing

La tecnica di miglioramento *level slicing* prevede che i DN distribuiti lungo l'asse *x* dell'istogramma siano divisi in una serie di intervalli definiti *slices* (fette) mediante intervento dell'operatore. Tutti i DN che ricadono nella stessa *fetta* vengono riclassificati con un valore costante. Il risultato è una sorta di classificazione dell'immagine in classi discrete.

Un'applicazione di questo metodo viene fatta con le immagini termiche (infrarosso termico), dove lo *slicing* è usato per codificare classi discrete di temperature con toni di grigio o scale di colore.

##### 3.3.2.3. Contrast stretching

Il *contrast stretching* è il metodo di manipolazione più utilizzato. Le immagini digitali da telerilevamento sono solitamente codificate in intervalli di valori interi (per esempio 256 livelli di grigio per una codifica a 8 bit). I DN in una singola immagine raramente si estendono per tutto questo intervallo, ma sono compressi su pochi valori e questa è la causa del contrasto ridotto nelle immagini non enfattizzate. Lo scopo dello *stretching* è pertanto quello di espandere, ossia stirare (in inglese *to stretch*) lo stretto intervallo di DN sull'intera gamma di livelli di grigio disponibile.

Il risultato è un'immagine dove è accentuato il contrasto fra le superfici di interesse in modo da rendere migliore la lettura all'analista d'immagine.

Questa espansione dei valori di DN si ottiene tramite l'applicazione di una curva di trasformazione all'istogramma dell'immagine non migliorata, la quale genera un istogramma di uscita più esteso dell'originale. Nella figura 3.14 viene mostrata l'immagine non migliorata con il suo istogramma (da notare la *compressione* in pochi DN).

Attraverso l'applicazione di una curva di trasformazione, in questo caso una retta, viene generato un istogramma ampliato: il valore minimo di DN dell'istogramma di origine, pari a 12, viene stirato al minimo della gamma a 8 bit, cioè zero, mentre il valore massimo di circa 170 viene portato a coincidere con il massimo consentito: 255.

Il risultato è un'immagine più contrastata che mostra più informazioni della precedente (figura 3.15). È importante sottolineare che l'informazione era già pre-

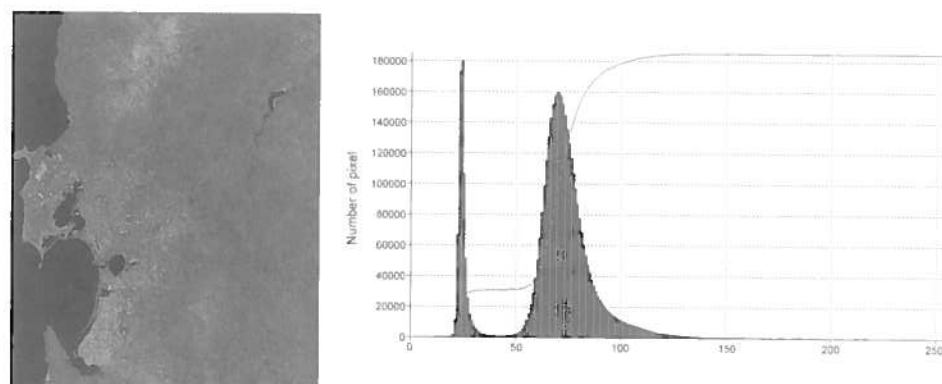


Figura 3.14. Immagine non stirata a) e relativo istogramma b)

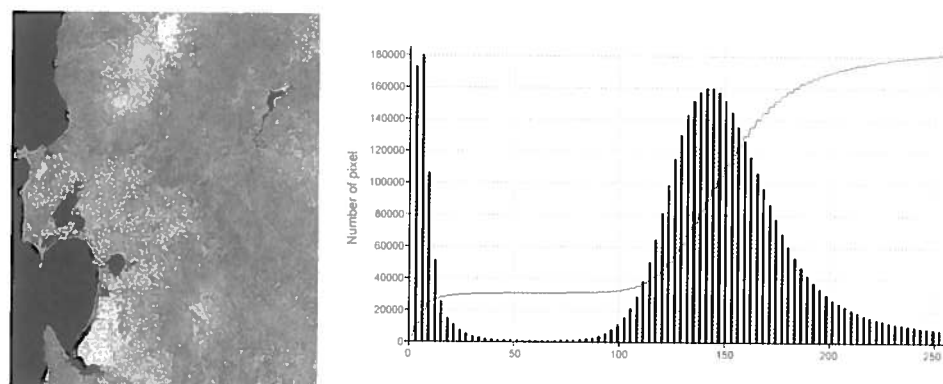


Figura 3.15. Immagine dopo lo stretching, con istogramma

sente nell'immagine prima dello *stretching* e la trasformazione l'ha solamente resa più evidente.

A partire da un'immagine non migliorata esistono diversi tipi di stretching, ciascuno differente a seconda della natura della curva di trasformazione:

- uno stretching semplice e molto comune è lo *stretching lineare* (*linear stretching*), dove la curva di trasformazione è una linea retta (figura 3.16). La curva può essere costruita in vari modi, variando essenzialmente la sua pendenza: può trasformare il minimo e il massimo dell'istogramma di ingresso nel minimo e massimo della dinamica (per esempio 0-255) oppure può *tagliare* (o, in altri termini *saturare*) le code dell'istogramma di entrata con una pendenza maggiore (figura 3.17). In questo caso, alcuni valori poco rappresentativi presenti nelle parti estreme dell'istogramma non verranno considerati nell'immagine migliorata, nel senso che saranno posti uguali ai valori minimi e massimi della gamma. Di solito, uno stretching che tagli le code dell'istogramma genera un'immagine con contrasto migliore di uno che ridistribuisce tutti i valori

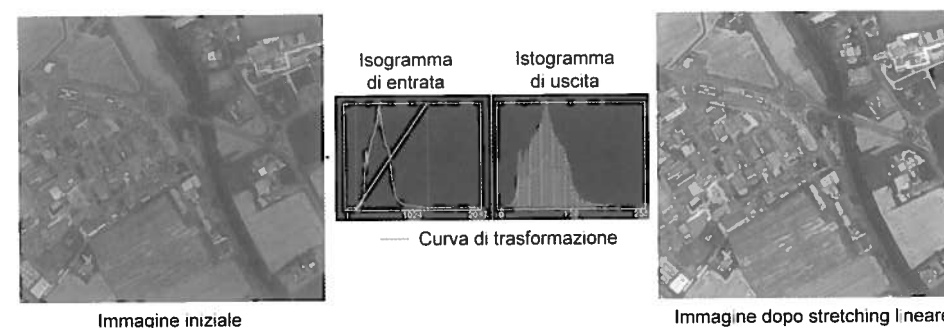


Figura 3.16. Stretching lineare generico

dell'immagine di ingresso. Alcuni software propongono di default stretching lineari cosiddetti al 2%, poiché tagliano il 2% della distribuzione ai margini dell'istogramma;

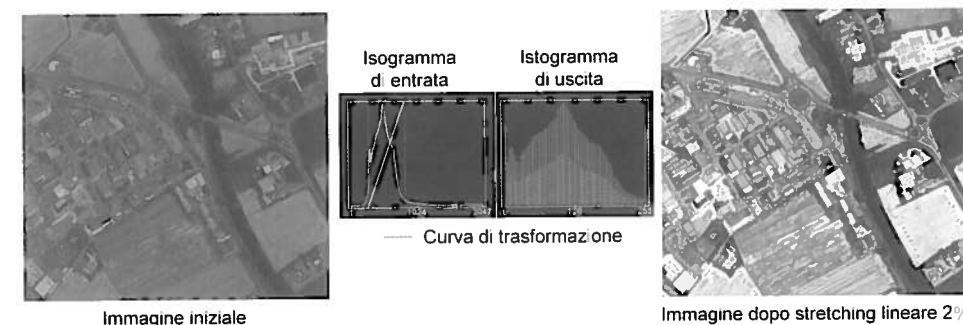
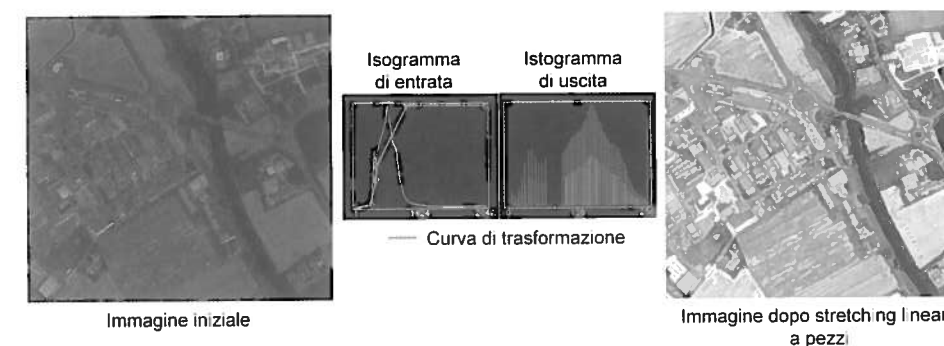


Figura 3.17. Stretching lineare 2%

- lo *stretching lineare a pezzi* (*piecewise linear stretching*) deriva dal precedente e la curva di trasformazione è una spezzata avente segmenti a pendenze diverse (figura 3.18); dato che a pendenze maggiori corrisponde uno stiramento maggiore (e quindi un maggiore aumento del contrasto), l'uso di una spezzata

Figura 3.18. Stretching lineare a pezzi (*piecewise*)



consente di applicare a diverse porzioni dell'istogramma segmenti a pendenze diverse per enfatizzare quelle parti che più interessano;

- l'*equalizzazione (histogram equalization)* è un particolare miglioramento dove la curva è modellata in modo da assegnare i valori di grigio in uscita sulla base della frequenza delle classi dell'istogramma dell'immagine non migliorata (figura 3.19). In particolare, un maggior numero di livelli viene assegnato alla porzione più frequente dell'istogramma, mentre un minor numero di livelli a quella meno frequente, cercando di fare in modo che ad ogni livello sia assegnato più o meno lo stesso numero di pixel;

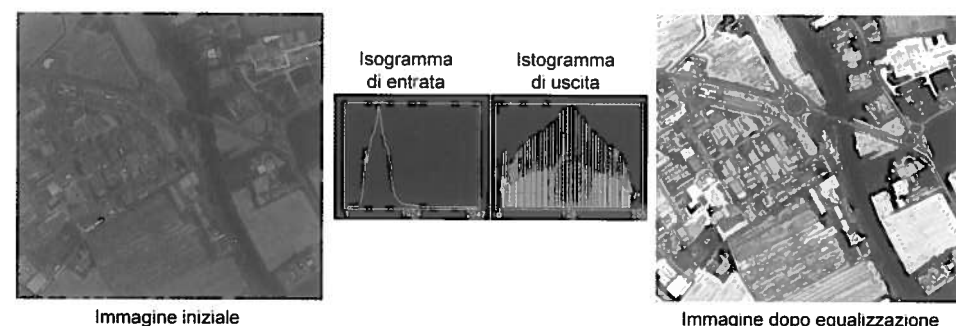


Figura 3.19. Equalizzazione (*histogram equalization*)

- lo *stretching gaussiano (Gaussian stretch)* – figura 3.20) prende il suo nome dal fatto che questo metodo tende ad adattare l'istogramma dell'immagine non migliorata ad una curva gaussiana (a campana).

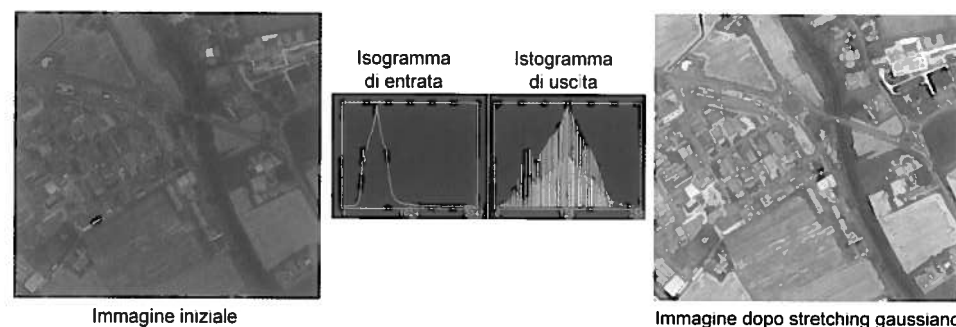


Figura 3.20. Stretching gaussiano

È opportuno riportare ora alcune considerazioni a proposito delle tecniche di stretching: la prima e più importante è che non esiste un metodo universalmente più efficace degli altri fra quelli indicati. Va specificato in prima analisi che lo stretching è un'operazione di carattere interattivo, dove l'utente sperimenta varie trasformazioni analizzando ogni volta i risultati finché non raggiunge quello che risulta migliore per i suoi scopi. Spesso i software di elaborazione immagini for-

niscono degli stretching predefiniti, ma non sempre essi si adattano all'immagine che si sta elaborando. Infatti, si deve sottolineare che lo stretching è una tecnica strettamente dipendente dalla distribuzione dei valori di DN dell'immagine considerata, tanto che due immagini di due aree differenti, come anche due immagini della stessa area ma riprese in momenti diversi o da sensori diversi, non possono di norma essere trattate con la stessa tecnica di miglioramento del contrasto.

Alcuni software per l'elaborazione di immagini offrono la possibilità di intervenire manualmente sull'istogramma, in modo da decidere i valori da tagliare, la pendenza della curva di trasformazione, come suddividere un'eventuale spezzata per lo *stretching piecewise linear*, ecc. Se il programma è sufficientemente evoluto, l'applicazione della trasformazione non avviene direttamente sul file dell'immagine, in quanto ciò comporterebbe l'alterazione permanente dei valori dei pixel e la perdita di quelli originali, ma utilizzando la cosiddetta *lookup table*, ovvero una sorta di tavolozza di livelli di grigio ai quali vengono fatti corrispondere i valori dei pixel trasformati dallo stretching. L'immagine, con questa sorta di maschera applicata, appare modificata anche se i valori originali delle singole celle rimangono inalterati. Programmi meno sofisticati, invece, applicano direttamente la trasformazione scrivendo i nuovi valori sul file immagine, per cui è sempre opportuno mantenere copie di riserva o salvare su nuovi file.

### 3.3.3. Il miglioramento mediante operatori locali

Come si è visto, le tecniche di miglioramento puntuale operano sull'immagine a livello radiometrico, modificando il valore del singolo pixel per ottenere un migliore contrasto. Le tecniche che utilizzano operatori locali, invece, agiscono a livello spaziale, nel senso che il risultato dell'operazione effettuata su un determinato pixel dipende dal valore del pixel stesso e dai valori dei pixel circostanti. L'operatore locale utilizzato per queste tecniche è il cosiddetto *filtro di convoluzione*. In un'operazione di *convoluzione*, il valore di un dato pixel è sostituito dal risultato di una o più operazioni elementari eseguite sull'elemento stesso e sugli elementi vicini. Tutti gli elementi considerati sono moltiplicati per coefficienti dipendenti dall'operazione da realizzare.

Un *operatore locale di convoluzione* come il filtro di convoluzione assume la forma di una matrice di  $n \cdot n$  celle, dove  $n$  è un numero dispari (figura 3.21), di solito 3 o 5. All'interno delle celle sono presenti valori numerici rappresentanti i coefficienti per i quali saranno moltiplicati i valori dei DN dei pixel. Essendo questa matrice il nucleo della con-

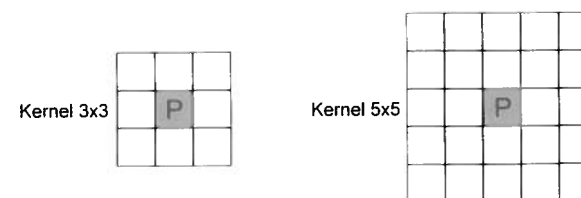


Figura 3.21. Esempi di *kernel* usati per gli operatori di convoluzione

voluzione, essa viene anche chiamata *kernel* (termine inglese che significa *nocciolo*). Durante l'operazione di convoluzione, la matrice del *kernel* si posiziona sull'immagine in modo che il centro del *kernel* coincida con un dato pixel *P* e le altre sue celle con i pixel adiacenti a *P* (figura 3.22). A questo punto, i valori di DN del pixel *P* e dei suoi vicini vengono moltiplicati per i coefficienti presenti nelle corrispondenti celle del *kernel*. Il nuovo valore DN' del pixel *P* viene quindi determinato sulla base dei suoi vicini da un'operazione definita per lo scopo della convoluzione. Di solito, questa operazione è una somma.

Per esempio, per sostituire al DN del pixel *P* la media (da cui *filtro average*) di tutti gli 8 pixel vicini, si deve applicare un *kernel* come quello mostrato in figura 3.23. I valori di DN di tutti i pixel che ricadono sotto al *kernel*, compreso quello di *P*, sono moltiplicati per 1/9 e il risultato sommato (oppure: la somma dei valori di DN tutti i pixel sarà divisa per 9). Il risultato è il nuovo valore DN' del pixel *P*.

I filtri più utilizzati nell'elaborazione d'immagini possono essere divisi in due principali categorie:

- filtri passa-basso (*low pass*);
- filtri passa-alto (*high pass*).

I filtri passa-basso hanno l'effetto di ridurre il contrasto e addolcire le discontinuità. Vengono anche definiti *smoothing filters* (filtri per l'ammorbidimento dell'immagine) oltre che *average*. Tecnicamente, i filtri passa-basso tendono a eliminare gli elementi ad alta frequenza e mettere in evidenza quelli a bassa frequenza. In pratica questo si traduce in un'esaltazione delle caratteristiche dominanti dell'immagine e una riduzione del dettaglio. Se si vuole leggere al meglio l'immagine nel suo insieme, osservando le grandi classi di superfici presenti (boschi, superfici agricole, ecc.), il filtro passa-basso riduce il "rumore" dovuto agli elementi ad alta frequenza e quindi rende l'immagine meno "faticosa" da esaminare.

I filtri passa-alto hanno l'effetto di accentuare le zone dove i pixel hanno improvvise variazioni di valore. Il risultato è un generale aumento della nitidezza dell'immagine. Per questa ragione si possono anche chiamare *sharpening filters* (appunto filtri di accentuazione della nitidezza). I filtri

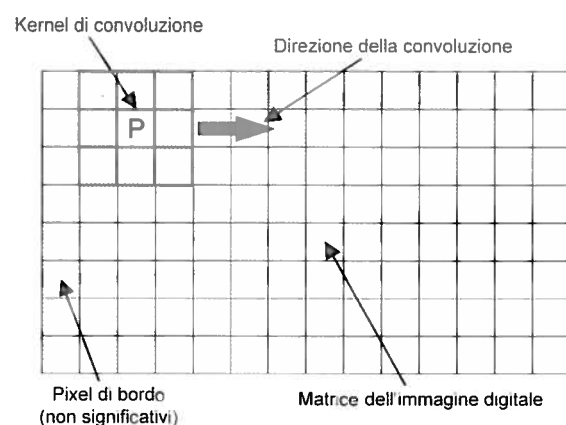


Figura 3.22. Operazione di convoluzione su una immagine digitale

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

Figura 3.23. Kernel di un filtro average

passa-alto tendono, al contrario dei passa-basso, a esaltare gli elementi ad alta frequenza, quindi i dettagli. Un'immagine filtrata con un tale *kernel* va letta nei suoi particolari, che sono stati messi in evidenza.

Un tipico filtro passa-basso si ottiene mediando i valori dei pixel vicini come mostrato in figura 3.24 per i due *kernel* di 3 · 3 e 5 · 5.

Un esempio di filtro passa-alto è quello che si ottiene usando un coefficiente positivo per il pixel centrale e coefficienti negativi per i vicini (figura 3.25). Questo tipo di filtro prende anche il nome di *edge enhance*, in quanto mette in evidenza le zone dell'immagine dove sono presenti nette differenze di DN.

Altri filtri passa-alto si usano per risolvere problemi correlati all'identificazione di discontinuità fra oggetti con nette differenze di risposta spettrale. Questi operatori, infatti, sono concepiti in modo tale da individuare nell'immagine le zone dove il contrasto tra i diversi valori di DN è più marcato. Tipicamente vengono usati in geologia per individuare le lineazioni correlate a fratture o faglie.

Data questa proprietà, essi sono chiamati filtri *edge detect*. Le immagini risultanti dall'applicazione di un filtro *edge detect* perdono spesso gran parte della loro informazione mantenendo solo quella relativa alle zone di transizione. Queste, fra l'altro, possono

1	1	1
1	1	1
1	1	1

Figura 3.24. Due esempi di filtro passa basso (*lowpass*)

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

Figura 3.25. Due esempi di filtro passa alto (*edge enhance*)

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

Figura 3.26. Filtri direzionali

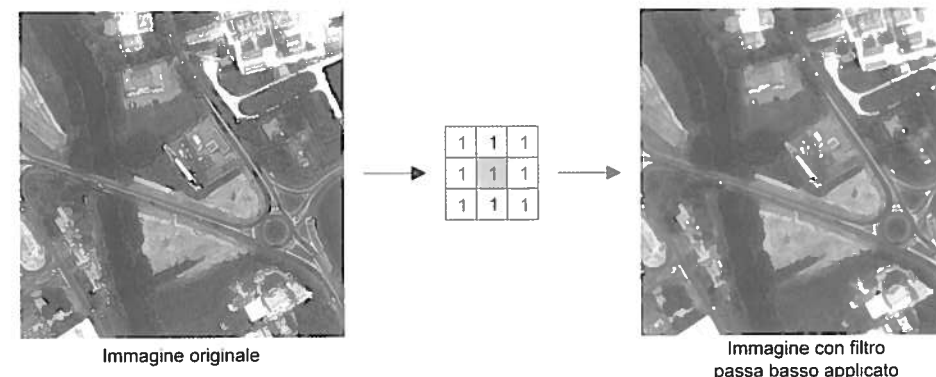


Figura 3.27. Applicazione di un filtro passa basso

essere orientate nello spazio in maniera diversa e, per questo motivo, sono necessari *kernel* appositi per orientamenti diversi. Ad esempio, i filtri mostrati in figura 3.26 accentuano rispettivamente le discontinuità verticali e orizzontali.

Nelle figure 3.27 e 3.28 vengono mostrati esempi di applicazione di alcuni tipi di filtri. Nella figura 3.27 è mostrata un'immagine prima e dopo l'applicazione di un filtro passa-basso. Si noti come l'immagine appare più "morbida" grazie alla riduzione del dettaglio.

Nella figura 3.28 sono invece mostrati due tipi di filtro passa-alto: a) è visibile l'immagine prima della convoluzione; b) dopo l'applicazione di un filtro passa-alto (esaltazione delle discontinuità – *edge enhance*); c) dopo l'applicazione di un filtro per l'identificazione delle discontinuità (*edge detect*), detto anche di Sobel. Quest'ultimo filtro è costituito da due *kernel*, uno per le discontinuità verticali e l'altro per quelle orizzontali, applicati entrambi all'immagine. Si noti la differenza fra l'immagine con il filtro *edge enhance* applicato e quella con l'*edge detect*: è opportuno specificare che nonostante i due nomi siano simili,

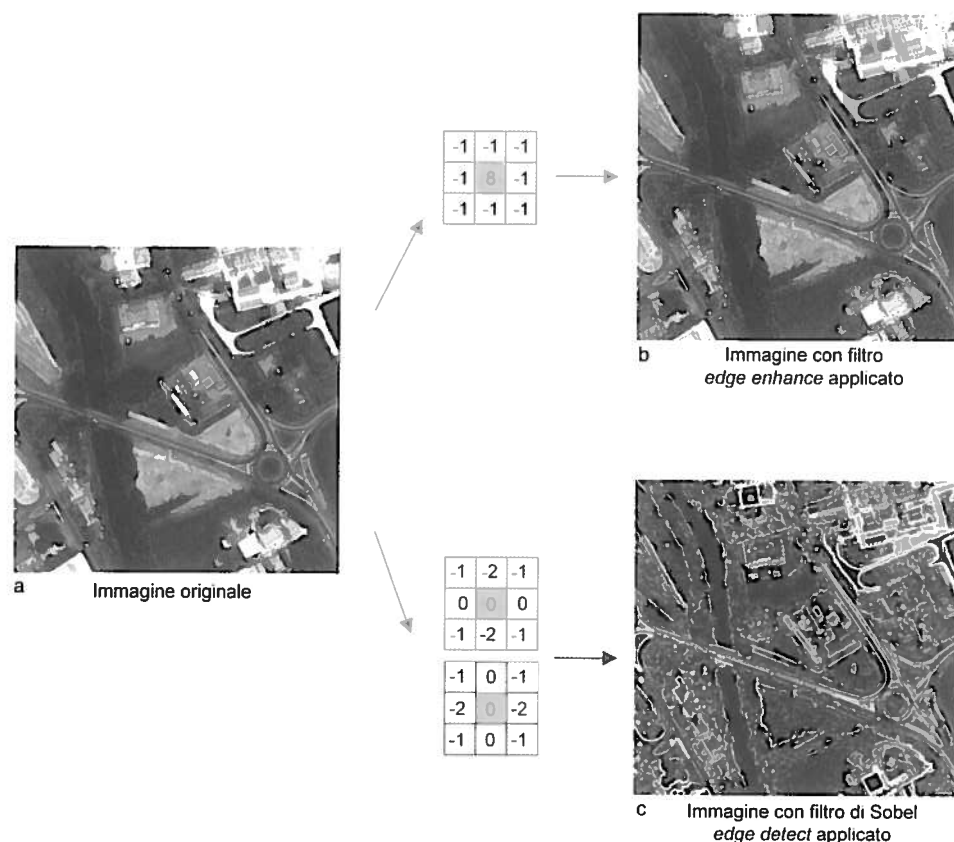


Figura 3.28. Applicazione di filtri passa alto

i risultati sono completamente differenti. Nel primo caso, infatti, le discontinuità sono esaltate, ma l'immagine resta leggibile nel suo complesso, mentre nel secondo caso, solo le discontinuità vengono mostrate e il resto dell'immagine perde di leggibilità.

### 3.4. La trasformazione delle immagini

#### 3.4.1. Cenni introduttivi

Con le tecniche di miglioramento delle immagini mostrate nel paragrafo 3.3, si sono trattate operazioni di carattere qualitativo, finalizzate soprattutto al miglioramento della leggibilità dell'immagine in fase di fotointerpretazione attraverso operatori radiometrici e spaziali. Queste tecniche possono essere applicate sia a singole bande spettrali che a immagini multi-banda.

In questa parte, invece, si tratteranno quelle operazioni che mirano alla trasformazione di immagini multi-banda attraverso combinazioni di due o più delle sue bande spettrali, al fine di generare nuove immagini. Lo scopo di ciò è ottenere un dato le cui caratteristiche siano più adatte a determinati scopi rispetto all'immagine originale. Ad esempio, la trasformazione utilizzando un indice di vegetazione genera, a partire dalle due bande spettrali del rosso e dell'infrarosso vicino, un'immagine che risulta molto più efficace rispetto a esse nel mostrare proprietà relative alle piante, quali lo stato di salute e la densità. L'operazione matematica di sottrazione applicata a due immagini acquisite dal medesimo sensore sulla stessa zona in momenti diversi è in grado di mostrare i cambiamenti avvenuti in quella data area (*change detection*).

Nei prossimi paragrafi si tratterà un certo numero di operazioni fra bande spettrali, a partire dalle aritmetiche, tra le quali saranno trattati in particolare dettaglio i rapporti di banda (fra cui gli indici di vegetazione), integrando poi con cenni relativi ad alcune altre elaborazioni spesso utilizzate: l'analisi delle componenti principali e la fusione dati (o *pan-sharpening*).

#### 3.4.2. Le operazioni fra bande spettrali

Grazie alla co-registrazione geometrica di tutte le bande di un'immagine multi-spettrale, ovvero il fatto di essere riferite tutte allo stesso sistema di riferimento e occupare il medesimo spazio geografico, i pixel di coordinate generiche  $x, y$  appartenenti a ciascuna banda sono tutti spazialmente sovrapposti gli uni sugli altri. Questo fa sì che i DN di una banda possano essere combinati con quelli di un'altra banda attraverso un'operazione. Virtualmente sono possibili tutte le operazioni, da quelle elementari di somma, sottrazione, moltiplicazione e divisione a combinazioni di queste e di altre in equazioni complesse a piacere. In fondo, è il



caso di sottolineare che i  $DN$  sono numeri e sono quindi in tutto e per tutto soggetti alle leggi matematiche.

Esistono comunque alcune operazioni algebriche che assumono un significato particolare e vengono utilizzate più di frequente rispetto ad altre. Di seguito si vedranno alcune delle possibili operazioni e la loro utilità.

#### 3.4.2.1. Somma

La somma fra i  $DN$  di due bande pixel a pixel ha senso soltanto se la si utilizza per calcolare una media. È pertanto necessario dividere il risultato della somma per due. L'utilizzo è raro ma potrebbe essere ad esempio quello di conoscere la media della radianza dei pixel in due bande spettrali diverse o nella stessa acquisita in momenti diversi.

#### 3.4.2.2. Differenza

La differenza fra bande assume invece un significato più importante rispetto alla somma, se si considera l'operazione in senso multi-temporale: ripresa la stessa banda spettrale nella stessa data (o almeno nello stesso mese) ma in anni diversi, si effettua la differenza fra la banda più recente e la più vecchia per individuare i cambiamenti che sono intervenuti nell'intervallo temporale. Questa tecnica prende il nome di *change detection* ed è utilizzata soprattutto per individuare i cambiamenti di uso o copertura del suolo nel tempo. È opportuno sottolineare che questa tecnica ha valore solo se dalle bande spettrali coinvolte viene eliminato l'effetto di disturbo dell'atmosfera.

#### 3.4.2.3. Moltiplicazione

La moltiplicazione fra bande si effettua al solo scopo di mascherare una parte dell'immagine. Per esempio, in un'immagine contenente una porzione di terraferma e una di mare, può essere utile eliminare l'informazione dell'una o dell'altro, a seconda di dove si vuole concentrare l'attenzione. Eliminare l'informazione spettrale di una grande categoria di superfici come in questo caso permette infatti di ridurre l'istogramma a una sola "campana", agevolando le operazioni di stretching. In sostanza, un'immagine sarà costituita dalla banda spettrale che si vuole mascherare e l'altra sarà una matrice raster contenente solo valori pari a uno o zero. I valori zero dovranno essere localizzati dove si vuole mascherare. Infatti con la moltiplicazione, i  $DN$  della banda spettrale potranno essere annullati ( $DN \cdot 0$ ) o lasciati immutati ( $DN \cdot 1$ ).

#### 3.4.2.4. Divisione

Il rapporto (o divisione) fra bande è l'operazione più usata perché essa è quella che maggiormente riesce a evidenziare le differenze di  $DN$  fra pixel appartenenti a bande diverse. Se due pixel di due bande hanno valori vicini, il rapporto si approssimerà a uno. Se invece hanno valori progressivamente più lontani, il rapporto tenderà sempre più a evidenziare questa differenza.

Uno dei maggiori vantaggi dei rapporti di banda è quello di eliminare il cosiddetto *effetto del rilievo*. Se si considera il caso di due tipi di bosco (figura 3.29) su due versanti, uno illuminato dal sole e l'altro all'ombra, i  $DN$  osservati per lo stesso tipo di copertura vegetale sui due versanti saranno diversi e, in particolare, quelli sul versante in ombra saranno più bassi. I valori nel rapporto tra le due bande per ciascun tipo di copertura saranno invece quasi identici, indipendentemente dalle condizioni di illuminazione. Per questo si dice che un rapporto di bande tende a compensare le variazioni di luminosità dovute alla morfologia. È tuttavia indispensabile, affinché l'effetto del rilievo venga efficacemente eliminato, che le bande spettrali coinvolte siano state sottoposte a calibrazione e correzione per l'effetto atmosferico.

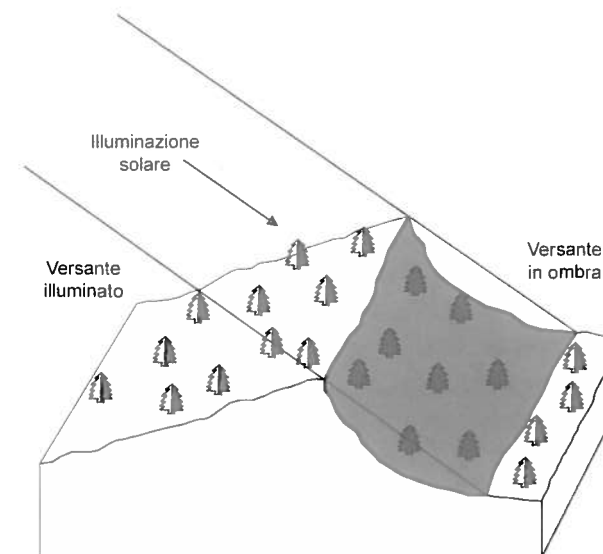


Figura 3.29. Differenti condizioni di illuminazione in base alla morfologia (fonte: Lillesand & Kiefer 1994, modificato)

#### 3.4.3. Gli indici di vegetazione

Un tipo particolare di rapporto tra bande è rappresentato dagli *indici di vegetazione* (IV). Nella sua forma più semplice l' $RVI$  (*Ratio Vegetation Index*) è il rapporto fra la riflettanza nella banda centrata sull'infrarosso vicino ( $\rho_{NIR}$ ) e quella centrata sul rosso ( $\rho_R$ ):

$$RVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_R} \quad (3.8)$$

L'indice di vegetazione, infatti, sfrutta la proprietà delle piante di avere un piccolo positivo di riflettanza nella regione dell'infrarosso vicino e un piccolo negati-

vo nella regione del rosso (vedere figura 1.6) legati alla loro attività fotosintetica e rappresenta quindi l'operatore più appropriato per esaltare questa grande differenza di valori. Il suo utilizzo dovrebbe tuttavia essere molto prudente, al fine di non trarre conclusioni erranee dai risultati ottenuti. Infatti, finché l'IV viene calcolato per una singola immagine di un determinato istante temporale e l'analisi che se ne fa è confinata a queste condizioni, l'indice è efficace per fornire una valutazione qualitativa della presenza e densità di vegetazione. Nel momento in cui si desidera fare un'analisi multi-temporale, mettendo a confronto IV calcolati in periodi diversi (stagioni o anni), è indispensabile che le immagini siano state in precedenza calibrate e corrette per l'effetto di disturbo atmosferico. Infatti, in mancanza di questa operazione, le diverse condizioni dell'atmosfera nei diversi momenti di acquisizione renderanno ogni raffronto impossibile.

Una variante dell'RVI sopra mostrato è rappresentata dal cosiddetto *indice di vegetazione a differenza normalizzata*, abbreviato comunemente con NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Esso è stato introdotto principalmente per ovviare al problema del semplice VI di restituire divisioni per zero. Il valore dell'NDVI è definito come:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (3.9)$$

L'NDVI può assumere valori fra -1 e +1. L'immagine risultante dal rapporto normalizzato delle bande NIR e R è un'immagine in toni di grigio caratterizzata dall'aver valori numerici del pixel di tipo reale, al contrario dei DN che sono numeri interi positivi. Tipicamente, l'immagine in toni di grigio viene visualizzata in pseudocolori, cioè al posto dei livelli di grigio si sceglie una scala cromatica che renda l'immagine meglio leggibile. Ad esempio, una scala tipica va dal marrone al giallo al verde per valori di NDVI crescenti.

L'indice di vegetazione normalizzato, pur avendo una dinamica tra -1 e +1, raramente assume i valori estremi. In presenza di una copertura di vegetazione, l'NDVI assumerà valori positivi fra 0,2 e 0,8 al crescere della densità, mentre in zone assolutamente prive di vegetazione (nubi, nevai e/o ghiacciai e anche specchi d'acqua) i valori saranno prevalentemente negativi. I suoli, che generalmente hanno una riflettanza nell'infrarosso vicino leggermente superiore a quella nel rosso (vedere figura 2.6), tendono ad assumere valori di NDVI compresi tra 0 e 0,1.

Sebbene usato in maniera molto diffusa, specialmente per analisi a scala globale, alcuni studi effettuati utilizzando l'NDVI hanno mostrato che questo indice tende a essere poco efficace se la copertura vegetale è bassa, come nelle zone aride, mentre, d'altra parte, perde di sensibilità a causa della saturazione, in caso di copertura molto densa (come nelle foreste pluviali).

Un indice più adatto per le zone aride e semi-aride è il *Soil-Adjusted Vegetation Index* (SAVI) che introduce un parametro correttivo per il contributo di riflettanza del suolo nudo in caso di scarsa copertura vegetale:

$$SAVI = \left( \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R + L} \right) \cdot (1 + L) \quad (3.10)$$

dove

$L$  = parametro empirico correttivo, che può variare fra 0 e 1.

Se  $L = 0$  il SAVI è uguale all'NDVI. Per situazioni con copertura vegetale densa si può impostare  $L \approx 0,25$ , per copertura intermedia,  $L$  si pone tipicamente intorno a 0,5, mentre i valori di  $L$  compresi fra 0,5 e 1 si utilizzano in caso di copertura progressivamente più scarsa.

Oltre al SAVI, sono stati sviluppati altri indici di vegetazione che tengono conto del contributo spettrale dei suoli, quali il TSAVI, l'MSAVI, variazioni rispetto al SAVI e il PVI, il *Perpendicular Vegetation Index*. Per una trattazione più dettagliata si rimanda ai testi indicati in bibliografia.

Come si è detto, uno dei fattori di disturbo più influenti sulle misure effettuate dai sensori è quello atmosferico. Per questo motivo, sono stati studiati e sperimentati numerosi indici di vegetazione che introducono parametri empirici per la correzione dell'effetto atmosferico. Fra questi uno dei primi a essere introdotto (Kaufman & Tanrè, 1992) è l'ARVI (*Atmospheric Resistant Vegetation Index*):

$$ARVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RB}}{\rho_{NIR} + \rho_{RB}} \quad (3.11)$$

dove

$$\rho_{RB} = \rho_R - \lambda (\rho_B - \rho_R)$$

$\rho_R$  e  $\rho_B$  = la riflettanza rispettivamente nella banda del rosso e del blu

$\lambda$  = parametro dipendente dal tipo di aerosol (materiale fine in sospensione nell'atmosfera).

L'ARVI impiega la banda del blu allo scopo di correggere l'effetto atmosferico. Infatti, tale banda, rispetto a quella del rosso, subisce una diffusione da parte delle particelle atmosferiche sensibilmente maggiore (si veda paragrafo 1.6). Questa differenza nella risposta alla diffusione permette di ricavare informazioni sull'opacità dell'atmosfera stessa. Per quanto riguarda il parametro  $\lambda$ , possono essere scelti molti valori diversi, dipendenti dal tipo di aerosol, ma, nel caso non si abbiano informazioni in merito, il valore suggerito è  $\lambda = 1$ .

Un altro indice di vegetazione che tiene conto dell'effetto atmosferico è l'EVI

(*Enhanced Vegetation Index*), studiato appositamente per i dati del sensore MODIS (Huete et al., 1994):

$$EVI = G \left( \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{L + \rho_{NIR} + C_1 \rho_R + C_2 \rho_B} \right) \quad (3.12)$$

dove i parametri empirici valgono  $G = 2,5$ ,  $L = 1$ ,  $C_1 = 6$  e  $C_2 = 7,5$ .

L'EVI, al contrario dell'NDVI, non subisce saturazione in presenza di copertura molto densa di vegetazione. Inoltre, introducendo la riflettanza della banda del blu, contribuisce a ridurre l'effetto atmosferico.

Sia l'ARVI che l'EVI, inserendo la banda del blu nelle loro formule, possono essere applicati solo in presenza di tale informazione. Quindi, se l'EVI è utilizzabile con i parametri empirici sopra mostrati solo con dati MODIS, l'ARVI può essere calcolato a partire da dati Landsat e MODIS, nonché da quelli dei sensori commerciali tipo Ikonos e Quickbird.

#### 3.4.4. L'analisi delle componenti principali

Uno dei più frequenti problemi che si incontrano nell'utilizzo di immagini multi-banda è che i singoli canali spettrali a volte portano informazioni molto simili fra loro e quindi determinano una ridondanza di dati. Questo vuol dire che se un sen-

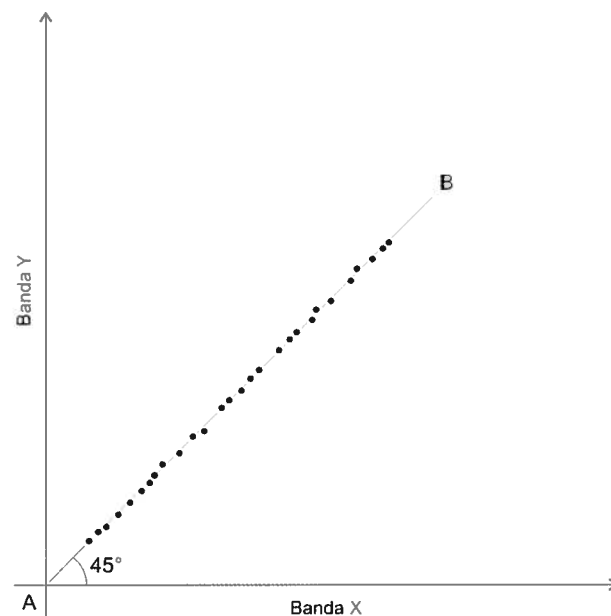


Figura 3.30. Scatterogramma di due bande perfettamente correlate e nuovo canale AB

sore ha  $m$  bande, non si avranno  $m$  diverse informazioni, ma un numero inferiore, pur rimanendo pari a  $m$  la quantità di dati.

Il fatto di rappresentare la medesima informazione su canali diversi si ha in virtù di una correlazione positiva esistente fra essi. Ad esempio, le bande spettrali della regione del visibile posizionate sul verde e sul blu sono spesso correlate positivamente fra loro in quanto la risposta della stragrande maggioranza delle superfici in questi due canali è molto simile.

Opposto è invece il caso della banda del rosso e di quella dell'infrarosso vicino, che, rispetto alle aree vegetate, sono negativamente correlate in quanto riportano un'informazione completamente diversa.

Rappresentando in uno scatterogramma due bande spettrali  $X$  e  $Y$  (figura 3.30), se queste sono perfettamente correlate positivamente fra loro, i vettori dei pixel di  $X$  e di  $Y$  si disporranno su una linea retta  $AB$  uscente dall'origine degli assi e inclinata verso l'alto a destra. È opportuno segnalare che questo caso limite generalmente non si verifica mai, in quanto i vettori dei pixel in realtà si dispongono a formare un'ellisse più o meno allungata con asse principale  $AB$ , ma serve per capire che in caso di alta correlazione positiva, l'informazione data dalle due bande  $X$  e  $Y$  può essere ugualmente fornita da un singolo canale costituito dall'asse  $AB$ . Perpendicolare ad  $AB$  può essere individuato un secondo asse  $CD$  (figura 3.31) dove può essere rappresentata un'altra informazione dei due canali originali. Così disposti, i nuovi canali  $AB$  e  $CD$  risultano molto meno correlati degli originali e pertanto possono fornire una maggiore informazione rispetto alle due bande  $X$  e  $Y$ .

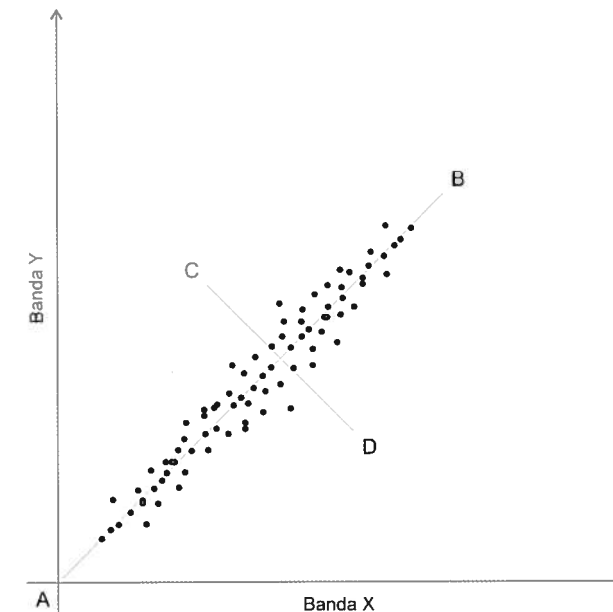


Figura 3.31. Nuovi canali non correlati AB e CD



La tecnica delle componenti principali (spesso abbreviata in PC, *principal components*) è stata sviluppata appunto per ridurre la ridondanza di informazione nei dati multispettrali, concentrando l'informazione in un numero minore di nuovi canali fra loro non correlati.

Le componenti principali, di solito, possono essere usate come operazione di miglioramento dell'immagine per scopi di interpretazione, oppure come pre-processamento prima di una classificazione (supervisionata o non supervisionata).

Un trattamento dettagliato di questa procedura è al di là degli scopi di questo testo e si rimanda alle pubblicazioni indicate in bibliografia per chi volesse approfondire. In questa sede si discuteranno comunque i concetti basilari su cui si fonda questa tecnica.

Per semplicità, si consideri inizialmente un'immagine multispettrale costituita da due sole bande. Se si rappresentano su due assi cartesiani i DN delle due bande, si ottiene lo scatterogramma come in figura 3.32. La distribuzione (o *nuvola*) dei punti rappresenta i valori di DN dei pixel dell'immagine, caratterizzati dalla coppia di coordinate  $DN_{b1}$  e  $DN_{b2}$ , cioè il DN nella banda 1 e il DN nella banda 2. Due bande correlate possiederanno una distribuzione localizzata intorno alla semiretta uscente dall'origine degli assi con angolo  $\alpha$  tendente a  $45^\circ$  per massima correlazione.

Le componenti principali non sono altro che nuovi assi creati dalla rotazione degli originali. Le bande associate con questi nuovi assi sono dette *sintetiche* perché non rappresentano più un valore fisico (la radianza), ma un valore artificialmente

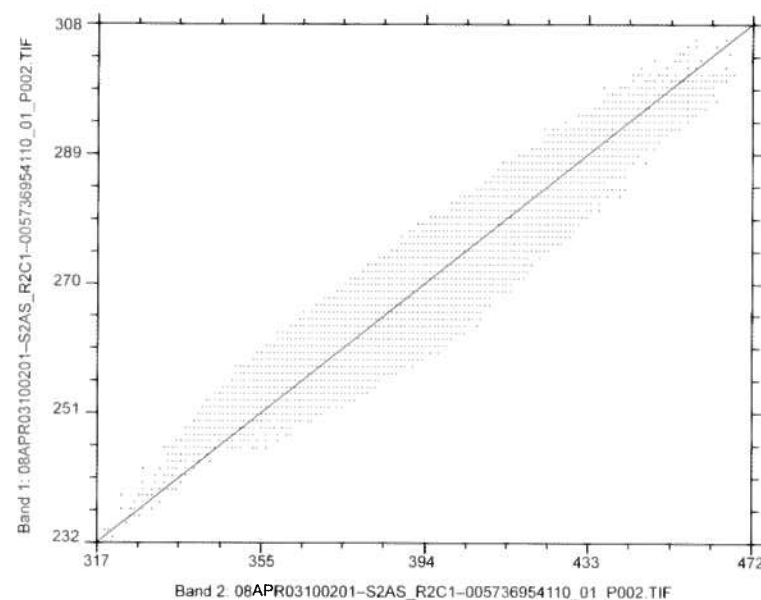


Figura 3.32. Scatterogramma di due bande

calcolato. In particolare, le componenti principali sono gli assi che hanno l'origine nel punto medio della distribuzione dei pixel: la prima PC si sviluppa nella direzione del massimo allungamento della *nuvola* e corrisponde cioè al semiasse maggiore dell'ellisse che approssima la distribuzione dei pixel, mentre la seconda PC è ortogonale alla prima.

La direzione della prima PC prende il nome di *primo eigenvettore*. Come si può osservare dalla figura 3.33, la prima PC è la nuova banda che ha la maggiore *varianza* (intendendo per *varianza* l'intervallo massimo di valori assunti dai punti della distribuzione lungo l'asse maggiore), anche più grande di quella delle bande originali. Questo comporta che i pixel vicini spettralmente nelle bande originali, nella nuova banda siano più distanziati e quindi meglio discriminabili. La varianza lungo la prima PC prende il nome di *primo eigenvalore*.

La seconda PC ha invece una varianza molto minore. Inoltre, le due bande sintetiche, essendo ortogonali, non sono correlate. Per la seconda PC si parlerà di secondo eigenvettore (ortogonale al primo) e secondo eigenvalore.

L'esempio a due dimensioni può essere trasportato in più dimensioni, considerando uno spazio dove la distribuzione dei pixel non è assimilabile a un'ellisse, ma a un ellissoide con  $n$  assi. Va detto, comunque, che dalla quarta componente principale in poi il contenuto di informazione diventa praticamente irrilevante, pertanto il loro uso è limitato. La prima PC, infatti, contiene spesso quasi il 90% dell'informazione (e quindi varianza), mentre la seconda e la terza contengono assieme meno del 10%. Per questo, in generale, le componenti principali più usa-

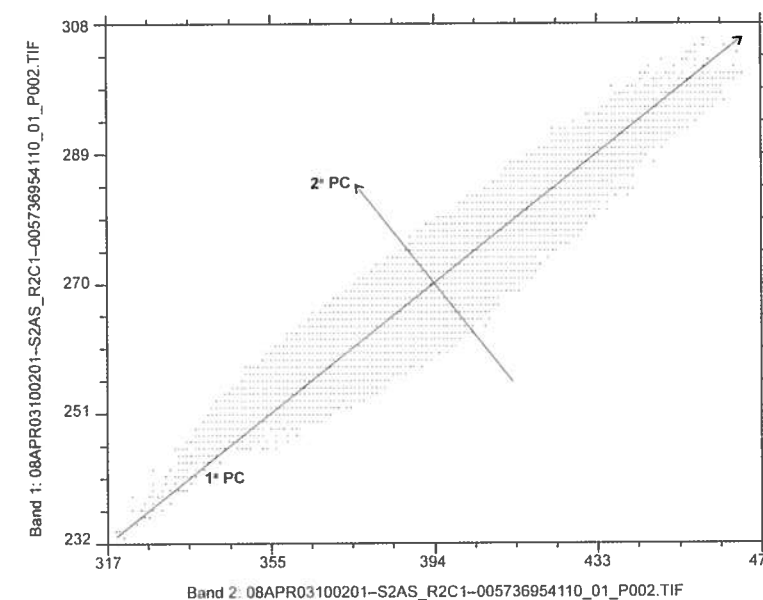


Figura 3.33. Componenti principali

te sono le prime tre, analizzabili come singole bande, ma spesso combinate in un *composite* a falsi colori RGB, dove la prima PC viene colorata in rosso, la seconda e la terza PC in verde e blu rispettivamente. Questa composizione contiene più informazione di qualunque combinazione di tre bande originali.

Alla base dell'analisi delle componenti principali sta la matrice di covarianza dalla quale gli eigenvettori e gli eigenvalori sono derivati.

La tabella 3.1 mostra un esempio di matrice di covarianza ottenuta dall'analisi delle componenti principali applicata ad una scena Landsat (bande da 1 a 7 esclusa la 6). Come intestazioni delle colonne vi sono le bande originali e come intestazioni delle righe le componenti principali. Nell'ultima colonna è rappresentata la varianza totale di ciascuna componente principale (ovvero gli eigenvalori).

I valori nella matrice rappresentano i coefficienti (eigenvettori) utilizzati per il calcolo di ciascuna componente principale a partire dalle bande originali, secondo l'espressione:

$$PCI_{ij} = a_1 x_{ij1} + a_2 x_{ij2} + a_3 x_{ij3} + \dots + a_m x_{ijm} \quad (3.13)$$

dove

$PCI_{ij}$  = valore del pixel di coordinate  $i,j$  per la prima componente principale

$a_1, a_2, a_3, \dots, a_m$  = coefficienti (eigenvettori)

$x_{ijk}$  = valore del pixel di coordinate  $i,j$  per la banda  $k$  ( $k = 1, \dots, m$ ).

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7	Varianza %
pc 1	0,093	0,210	0,392	0,303	0,690	0,476	88,23
pc 2	-0,303	-0,216	-0,395	0,781	0,167	-0,259	8,65
pc 3	-0,294	-0,417	-0,488	-0,466	0,434	0,311	2,22
pc 4	-0,058	-0,047	0,280	-0,257	0,507	-0,770	0,55
pc 5	-0,729	-0,294	0,562	0,010	-0,224	0,127	0,27
pc 6	0,528	-0,804	0,240	0,122	-0,037	0,032	0,07

Tabella 3.1. Matrice di covarianza relativa all'analisi delle PC per una scena Landsat

La tabella 3.1 mostra la matrice di covarianza fra le bande spettrali e le componenti principali per una scena Landsat. La prima riga contiene le relazioni fra la 1ª PC e le 6 bande dalla 1 alla 7 esclusa la termica. Tutte le bande sono positivamente correlate con questa componente principale, ma, in particolare, il contributo maggiore viene dato rispettivamente dalle bande 5, 7, 3 e 4. I valori positivi indicano una relativa sovrapposizione di informazione fra le varie bande (quindi una correlazione fra loro), per cui la prima PC, in sostanza, rappresenta una media delle sei bande originali, sebbene il contributo della banda 1 sia molto basso.

La seconda PC mostra invece un netto contributo della banda 4, in contrasto con le altre bande, per cui metterà principalmente in evidenza le zone vegetate. La terza PC contrappone invece le bande 5 e 7 alle altre. In termini di varianza, come si

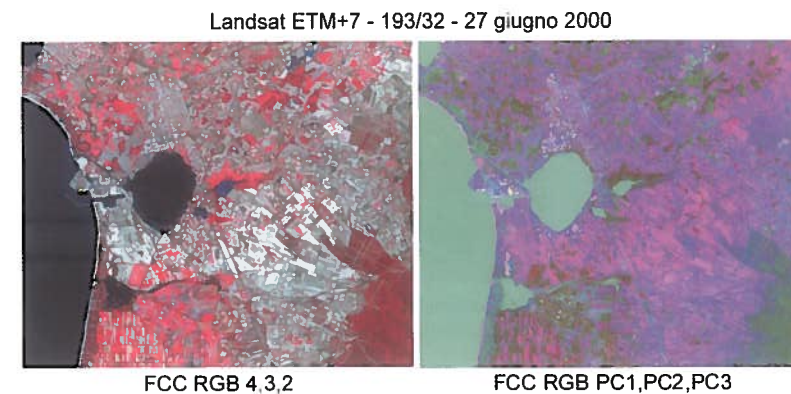


Figura 3.34. Confronto fra bande spettrali e componenti principali

vede dall'ultima colonna, le prime tre PC arrivano a rappresentare il 99% dell'informazione. Quello che si è ottenuto dal calcolo delle componenti principali è stato quindi una compressione dell'informazione da 6 bande iniziali a 3 finali.

#### 3.4.5. La fusione dati (*pan-sharpening*)

In primo luogo va evidenziato che, per motivi legati alle tecniche costruttive dei sensori, in generale, la risoluzione spaziale della banda pancromatica è sempre maggiore rispetto a quella delle bande cosiddette *multispettrali*. Questo comporta che il dettaglio degli oggetti discriminabili nel canale che abbraccia tutto il visibile (e spesso una parte dell'infrarosso vicino) sia di gran lunga il più alto, ma che a esso non sia direttamente associata l'informazione spettrale posseduta dalle altre bande. Ciò si traduce praticamente nel poter ottenere un'altissima risoluzione per immagini in bianco e nero della banda pancromatica, mentre una più bassa per le composizioni in veri e falsi colori delle bande multispettrali. Per esempio, il sensore Quickbird raggiunge i 60 cm per la prima e 2,4 m per le seconde.

In altre parole, l'utilizzatore delle immagini ha a disposizione due tipi di dati con caratteristiche complementari ma distinti gli uni dagli altri.

Esistono tuttavia delle tecniche che permettono di mettere insieme questi dati apparentemente disgiunti, combinando l'alta risoluzione spaziale della banda pancromatica con l'alta risoluzione spettrale delle altre bande. Queste tecniche prendono il nome di *fusione dati*, in inglese definite come *image sharpening* o *pan-sharpening*.

Rimandando a testi specializzati per una trattazione dettagliata dei metodi di trasformazione *pan-sharpening*, si illustrano di seguito quelli principali:

- trasformazione diretta e inversa da sistema RGB a HSI: un'immagine multispettrale rappresentata nel sistema RGB viene trasformata nel sistema colorimetrico



Figura 3.35. Combinazione della banda pancromatica e delle bande multispettrali del sensore Ikonos per generare un'immagine *pan-sharpened*

HSI e l'informazione geometrica della banda pancromatica (PAN) viene inserita al posto dell'intensità  $I$ . L'immagine HSPAN viene poi ritrasformata in RGB;

- trasformazione normalizzata dei colori (*trasformazione di Brovey*): questo metodo utilizza una combinazione matematica dell'immagine multispettrale e di quella pancromatica. Ciascuna banda multispettrale viene moltiplicata per il rapporto fra la banda pancromatica e la somma delle bande multispettrali. La funzione ricampiona automaticamente le tre bande multispettrali alla risoluzione del pancromatico;
- analisi delle componenti principali: si applica all'immagine multispettrale la trasformazione delle componenti principali. La prima PC viene sostituita dalla banda pancromatica ad alta risoluzione spaziale. Poi viene effettuata una trasformazione inversa (da componenti principali a bande originali) e il dato multispettrale viene ricampionato alla risoluzione del pancromatico.

La funzione di trasformazione *pan-sharpening* attraverso i metodi illustrati è una delle pre-elaborazioni che può essere richiesta alla compagnia di distribuzione delle immagini; in alternativa, essa è presente in numerosi *software* commerciali di *image processing* e GIS e in alcuni di quelli *open source*, come GRASS. ILWIS, che rappresenta il programma scelto per le esercitazioni di questo testo, invece non supporta questa operazione e quindi essa non potrà essere mostrata nella parte di esercitazioni.

## 4. LA CLASSIFICAZIONE DELLE IMMAGINI MULTISPETTRALI

### 4.1. Cenni introduttivi

La classificazione di immagini multispettrali è utilizzata per estrarre l'informazione tematica da immagini telerilevate in una maniera semi-automatica.

La classificazione è un processo caratterizzato da due fasi: la prima consiste nel riconoscimento di categorie di oggetti del mondo reale. Nel contesto del telerilevamento, questi oggetti sono elementi presenti sulla superficie terrestre (boschi, specchi d'acqua, centri urbani, ecc.). La seconda fase consiste nell'assegnare le entità riconosciute (spesso nella forma di pixel) a una determinata classe sulla base di una ben precisa regola di classificazione o regola di decisione (*decision rule*). La classificazione che si ottiene da immagini telerilevate è pertanto una classificazione della copertura del suolo. Esiste, nelle applicazioni di telerilevamento, anche una terza fase il cui scopo è quello di stabilire l'accuratezza della classificazione.

In questo processo multifase, la prima di esse necessita obbligatoriamente del contributo di un utente esperto che, con la sua capacità di riconoscere gli oggetti del mondo reale, può fornire al programma di classificazione gli elementi utili per applicare le regole di decisione. Per questo motivo la procedura prende il nome di *classificazione supervisionata* (*supervised classification*), contrapponendosi a un secondo tipo di classificazione dove l'intervento dell'utente è minimo e serve solo per imporre il numero di classi in cui frazionare la distribuzione dei pixel di un'immagine: la *classificazione non supervisionata* (*unsupervised classification*). Si consideri un pixel di un'immagine multispettrale. Per esso esistono simultaneamente  $m$  valori di DN corrispondenti alle  $m$  bande dell'immagine. Gli  $m$  valori del pixel considerato sono definiti, con il termine inglese, *feature vector*, traducibile in maniera un po' forzata in *vettori delle caratteristiche* (per questo, nel prosieguo della trattazione si utilizzerà il termine inglese). Se due *feature vector* sono vicini come valori, è possibile che i pixel associati siano raggruppabili in una stessa classe.

Nel gergo delle classificazioni, è comune che le bande spettrali di un sensore siano definite come *feature* (*caratteristiche*). Per cui, se si costruisce uno scatterogramma di due bande B1 e B2, si ottiene quello che viene definito un *feature*



*space* (spazio delle caratteristiche) (vedere figura 3.6). Questo spazio è a 2 dimensioni, dal momento che si considerano solo due bande, ma può diventare a  $m$  dimensioni rappresentando tutte le  $m$  bande o *feature* del sensore considerato. In un *feature space*, i pixel (*feature vector*) appartenenti alla medesima classe di copertura del suolo saranno presumibilmente vicini e formeranno un agglomerato, definito tecnicamente come *cluster* (grappolo). Pixel appartenenti ad altre classi formeranno altri *cluster*, distinti più o meno da questo (si veda figura 3.7). Lo scopo della classificazione è quello di assegnare i pixel dei vari *cluster* a classi di copertura del suolo che abbiano una reale corrispondenza con gli elementi presenti sulla superficie terrestre.

#### 4.2. La classificazione supervisionata

Come accennato nella parte introduttiva di questo capitolo, la classificazione supervisionata (o *supervised*) fa uso nella sua prima fase del contributo di un utente esperto per identificare gli elementi del mondo reale che verranno poi raggruppati in classi di copertura del suolo. Questa prima fase è anche definita come fase di *training* (*training phase*), perché in essa si istruisce il classificatore a distinguere i vari elementi, mediante zone di *training* (*training areas*), ossia zone campione rappresentativo di una determinata classe di copertura del suolo.

Nella fase successiva, sulla scorta delle indicazioni fornite, il classificatore utilizza una regola di decisione per assegnare tutti i pixel dell'immagine alle differenti classi. Le regole di decisione sono diverse e utilizzano principi che possono essere da molto semplici a molto complessi. Per esempio, essi possono basarsi semplicemente sulla delimitazione dei *cluster* mediante parallelepipedi oppure utilizzare funzioni di probabilità per determinare l'assegnazione dei pixel alle classi.

Una volta realizzata la classificazione, viene generata un'immagine tematica in uscita, dove i pixel, invece di contenere un valore di DN, hanno un codice numerico corrispondente a una delle classi definite in precedenza. È comune che, una volta ultimata la classificazione, si proceda a una valutazione della sua accuratezza. Di solito, viene scelto un certo numero di punti di controllo casualmente distribuiti la cui assegnazione nella classificazione viene verificata in situ. Sulla base del risultato del controllo, viene costruita una matrice, detta di *confusione*, che riporta il valore di accuratezza e, sulla base del quale, viene presa la decisione se ripetere o meno la classificazione modificando i parametri usati e/o integrando la fase di training con il rilevamento di più aree.

##### 4.2.1. La fase di training

Durante la fase cosiddetta di *training* vengono innanzitutto definiti il numero e la tipologia di classi di copertura del suolo da utilizzare. Per ogni classe deve essere

raccolta la verità a terra, ovvero un certo numero di aree campione rappresentative di quella classe. La verità a terra deve essere ottenuta a priori e mediante una campagna in situ, l'interpretazione di foto aeree o immagini ad alta risoluzione e di altri dati (cartografia tematica).

Sulla base della verità a terra si definiscono i *training samples* (campioni o aree di training) che possono essere pixel singoli o associazioni più o meno numerose di essi. A ciascun *training sample* viene assegnato il codice della classe di copertura del suolo.

Per ogni classe si avrà quindi un insieme di pixel con i loro *feature vector*, che saranno utilizzati nella fase successiva dal classificatore come campione rappresentativo di ogni classe per classificare tutti gli altri pixel dell'immagine.

Va sottolineato che la fase della classificazione è di vitale importanza e influenza (positivamente o negativamente) tutto il resto della procedura. In altri termini, se i *training sample* non sono scelti con precisione, la classificazione risulterà scarsamente accurata. Inoltre, sarà necessario anche selezionare un alto numero di *training sample*, in modo da ottenere un campione sufficientemente rappresentativo della classe. Un valore indicativo di questo numero è dato da  $30m$ , dove  $m$  è il numero di bande, ma in realtà è sempre meglio superare di gran lunga questo valore.

##### 4.2.2. I tipi di classificatore più usati

Una volta fornito l'insieme dei *training sample* per ogni classe di copertura del suolo, è compito dell'algoritmo di decisione (basato su una regola di decisione) suddividere il *feature space* secondo le indicazioni date per individuare le appartenenze dei pixel alle diverse classi.

Per ciascun possibile *feature vector* nel *feature space*, l'algoritmo deve decidere a quale insieme di pixel di *training* quel vettore è maggiormente simile. Dopo di ciò, il classificatore crea un'immagine di uscita dove a ogni pixel è assegnato un codice di classe. Alcuni algoritmi sono in grado di decidere che certi pixel non rientrano in nessuno dei *training sample* e quindi classificano tali celle come "non assegnate". Questo può accadere nel caso che i pixel in questione appartengano effettivamente a una classe di copertura del suolo non prevista nella fase di *training*. Preme sottolineare che indubbiamente è preferibile che essi siano definiti "non assegnati" piuttosto che assegnati casualmente a una delle classi previste.

Trovare la relazione fra classi e *feature vector* (in pratica: assegnare i pixel alle classi) non è un compito semplice. Esistono infatti diversi algoritmi che operano in maniera differente nel suddividere lo spazio delle caratteristiche. In questa sede si descriveranno tre di essi:

- *algoritmo del parallelepipedo* (*parallelepiped* o *box*): è il più semplice metodo di classificazione. In uno spazio a due dimensioni, vengono creati nel *feature*

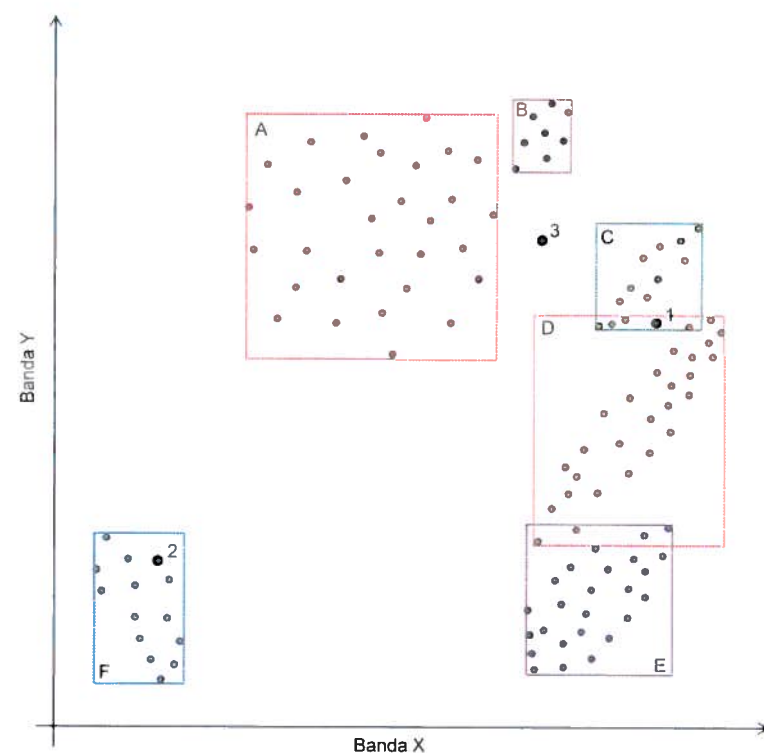


Figura 4.1. Regola del parallelepipedo

space rettangoli intorno ai *feature vector* dei pixel di *training* (figura 4.1) per definire ciascuna classe. In tre dimensioni, i rettangoli diventano parallelepipedi (cosiddette *scatole*, da cui *box*). La posizione dei parallelepipedi può essere definita dal valore massimo e minimo del *cluster* dei *feature vector* di *training* oppure centrati sul vettore medio e di dimensioni pari a  $n$  deviazioni standard per ogni banda (*feature*). L'utente può intervenire nella scelta di questi parametri. Nel *feature space* coesisteranno vari parallelepipedi, alcuni parzialmente sovrapposti, altri totalmente separati. Dove si verifica il primo caso, i pixel contesi fra più classi sono assegnati alla classe con parallelepipedo più piccolo (caso del pixel 1 nella figura 4.1 assegnato alla classe C). I pixel che cadono all'interno di *box* separati sono assegnati inequivocabilmente alla classe corrispondente (pixel 2 nella classe F), mentre quelli che non cadono in nessun parallelepipedo sono definiti "non assegnati" (pixel 3);

- *algoritmo della minima distanza dalla media* (*minimum distance to mean*). In questo metodo (vedere figura 4.2), prima viene determinato per ogni classe il vettore medio fra i vettori di *training* (indicato con una X in figura). Secondariamente, il *feature space* viene suddiviso assegnando a ciascun *feature vector* il codice della classe del più vicino vettore medio, in termini di distanza euclidea (quest'ultima

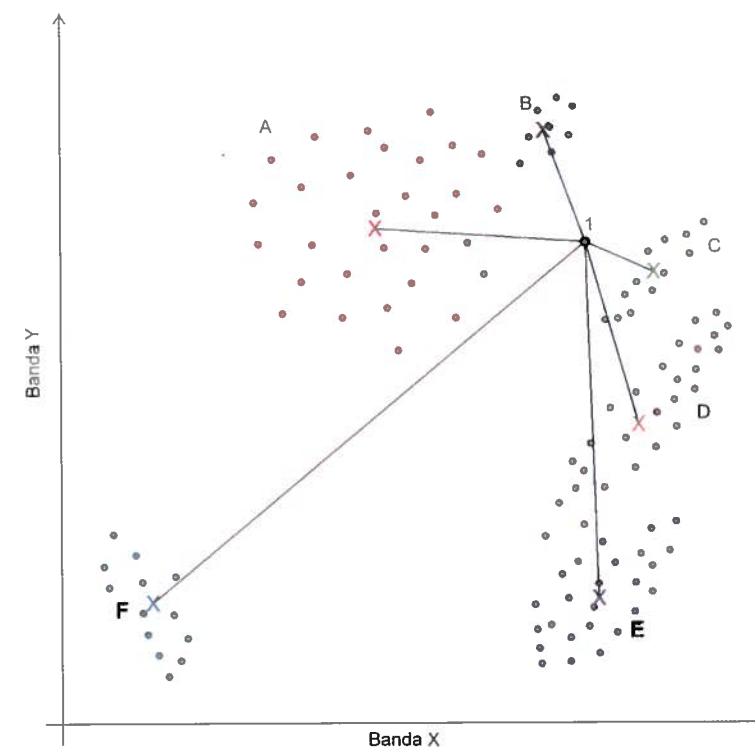


Figura 4.2. Regola della distanza minima dalla media

è definita come la distanza in linea retta fra due punti). Nella figura 4.2, il pixel 1 viene assegnato alla classe C, essendo il suo vettore medio il più vicino a 1. Normalmente, è possibile specificare una distanza massima che funziona da soglia per definire la classe. Se un pixel ricade in una zona del *feature space* al di là della soglia di ciascuna classe, esso sarà classificato come "sconosciuto";

- *algoritmo della massima verosimiglianza* (*maximum likelihood*). Questo classificatore è il più utilizzato grazie ai risultati più accurati che fornisce rispetto agli altri due sopra esposti. Esso opera assegnando ciascun *feature vector* alla classe per cui è maggiore la probabilità condizionale, definita come la probabilità che, selezionando un pixel  $x$  della scena, esso appartenga a una determinata classe C. Il pixel appartiene a C se:

$$P(C|x) > P(C_k|x) \quad (4.1)$$

dove

$P(C|x)$  = probabilità condizionale del pixel rispetto alla classe C

$P(C_k|x)$  = probabilità condizionale del pixel rispetto alla classe  $C_k$ .

In sostanza, il principio su cui si basa la classificazione secondo la massima verosimiglianza è basato sulla probabilità di appartenenza. Questa probabilità si

può visualizzare nel *feature space* come un'ellisse (figura 4.3). Si considerino ad esempio, nel *feature space* definito dalle due bande  $x$  e  $y$ , una serie di grappoli di pixel (*cluster*) rappresentati come ellissi concentriche aventi come centro il vettore medio del *cluster*. Ogni ellisse costituisce una curva di iso-probabilità. Allontanandosi dal vettore medio e intersecando quindi ellissi sempre più esterne, la probabilità che un punto appartenga a una data classe diminuisce. L'orientamento delle ellissi, inoltre, rappresenta il grado di correlazione fra le bande, altrimenti detta *covarianza*. Se l'asse principale delle ellissi è orientato verso l'alto a destra, la covarianza è positiva (classe D), mentre un orientamento verso l'alto a sinistra implica una covarianza negativa (classe F). La classe A, che ha come curve di iso-probabilità dei cerchi, dimostra una covarianza praticamente nulla. La lunghezza degli assi principali delle ellissi è invece una misura della varianza della distribuzione di pixel.

Ad esempio, si considerino le due classi D ed E. Esse mostrano entrambe covarianza positiva, ma varianza diversa. In particolare, si noti che, allontanandosi dal vettore medio lungo il semiasse maggiore, la probabilità diminuisce più lentamente che non allontanandosi lungo il semiasse minore. Inoltre, la varianza lungo i due semiasse determina la velocità con cui diminuisce la probabilità allontanan-

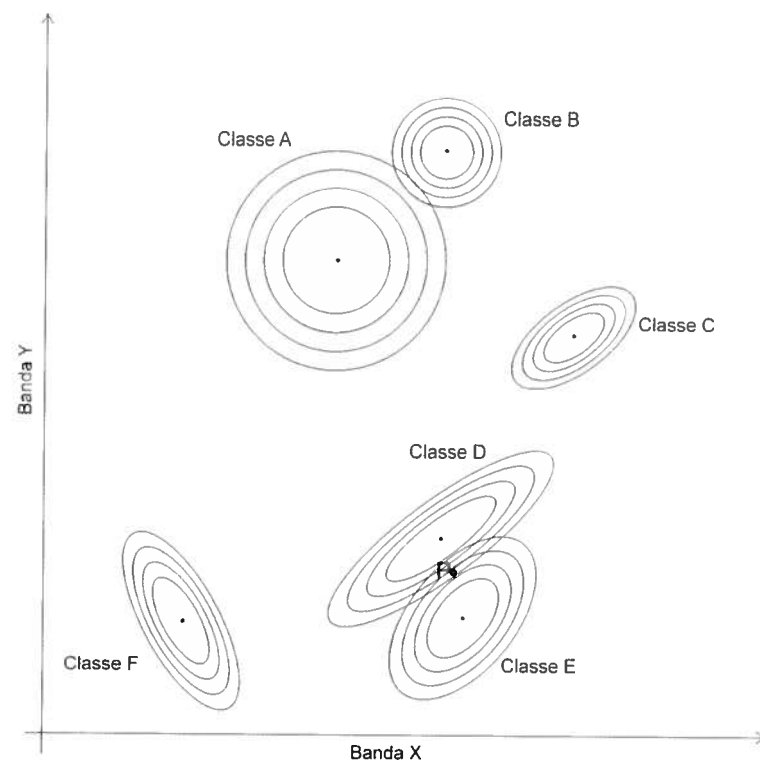


Figura 4.3. Regola della massima verosimiglianza

dosi lungo il medesimo semiasse in due classi diverse. Per la classe D, che mostra una varianza lungo il semiasse minore più piccola rispetto a E, la probabilità scenderà più rapidamente.

Pertanto, se si prende in considerazione un pixel  $P$  (figura 4.3), "conteso" fra le classi D ed E e praticamente equidistante dai vettori medi dei due *cluster*, l'assegnazione a una delle due classi avverrà sulla base della sua posizione rispetto alle ellissi di iso-probabilità. In particolare, si può notare che  $P$  si trova fra la seconda e la terza ellisse della classe E e fra la terza e la quarta della classe D. Perciò, secondo la regola della massima verosimiglianza,  $P$  sarà assegnato alla classe E.

#### 4.2.3. Verifica dell'accuratezza

Una volta che la procedura di classificazione è terminata, è necessario verificare il livello di errore del prodotto finale. Questo errore è considerato come dovuto alla non corretta assegnazione dei *feature vector* alle varie classi. Quello che viene determinato in questa fase è quindi il grado di accuratezza della classificazione. In generale, l'accuratezza della classificazione viene determinata generando un certo numero casuale di punti di controllo sparsi sull'immagine della classificazione e che normalmente andrebbero controllati in campagna. L'utente, spesso munito di GPS, verifica la copertura del suolo per ciascuno dei punti di controllo e la corrispondenza o meno con la classe assegnata dal classificatore.

Una prima valutazione della classificazione può essere anche fatta sulla base del numero di pixel assegnati alla classe "non assegnato". Infatti, questo numero è un'indicazione della generale rappresentatività delle classi di *training*. Più sono i pixel non classificati, minore è la rappresentatività delle zone di *training* (in pratica, è necessario sceglierne in maggior numero).

Il metodo più utilizzato per la rappresentazione dell'accuratezza di una classificazione è la cosiddetta *matrice di confusione* (o di errore). Questa matrice ha dimensioni  $m \cdot m$ , dove  $m$  è il numero di classi utilizzate per la classificazione. Nella tabella 4.1 è rappresentato l'esempio di una matrice d'errore.

Ref.	Classi						a	b	c
	1	2	3	4	5	6			
1	50	3	0	0	2	5	60	83,3	10
2	4	62	3	0	0	1	70	88,5	8
3	4	4	70	0	8	3	89	81,4	19
4	0	0	0	64	0	0	64	100	0
5	3	0	2	0	71	1	77	92,2	6
6	10	3	1	3	0	33	50	66,0	17
Somme	71	72	76	67	81	43	410	—	60

Tabella 4.1. Esempio di una matrice di errore



Gli elementi dell' $i$ -esimo rigo della matrice danno il numero di pixel di controllo che l'utente ha riconosciuto appartenenti alla classe  $i$  e che sono stati attribuiti dal classificatore alle classi da 1 a  $m$ . Nell'esempio di tabella 4.1, al secondo rigo, dei 70 pixel riconosciuti dall'utente come appartenenti alla classe 2 (si veda la colonna  $a$ ), 4 sono stati assegnati alla classe 1, 62 alla classe 2, 3 alla classe 3, zero alle classi 4 e 5 e 1 alla classe 6. Il totale dei pixel di controllo per la banda  $i$ -esima è dato alla colonna  $a$ . Lungo la diagonale è presente il numero di pixel identificati dall'utente come appartenenti alla classe  $i$  e correttamente assegnati dal classificatore. Gli altri numeri presenti sul rigo rappresentano invece il numero di pixel assegnati in modo non corretto (colonna  $c$ ). L'accuratezza per la classe  $i$ -esima è data lungo la colonna  $b$  ed è calcolata come rapporto fra il numero di pixel correttamente assegnati e il numero totale di pixel per quella classe. L'accuratezza totale è la media delle accuratze di ciascuna classe.

Un valore statistico particolarmente usato per la determinazione dell'accuratezza è il cosiddetto *coefficiente*  $k$  calcolato a partire dai valori della diagonale della matrice di confusione. Un valore di  $k$  pari a zero indica un'assoluta mancanza di rispondenza fra la classificazione e i dati di riferimento. Un valore di 1 indica invece totale rispondenza. Si aggiunga che alcuni autori (Montserud & Leamans, 1992) suggeriscono il valore di  $k$  pari a 0,75 come valore minimo per identificare una buona classificazione.

#### 4.3. La classificazione non supervisionata

La classificazione non supervisionata (o *unsupervised*) procede all'attribuzione dei pixel di un'immagine a un determinato numero di classi, senza l'intervento esterno di un utente. In sostanza, gli unici contributi sono dati per fornire il numero massimo di classi che si vogliono identificare e la distanza spettrale fra ogni classe. Dato questo presupposto, il classificatore rappresenta tutti i *feature vector* nel *feature space* e li raggruppa in *cluster* (il processo di classificazione non supervisionata prende anche il nome di *clustering*). Ogni *cluster* costituisce una classe. Si noti che non si è parlato di classi di copertura del suolo. Infatti, le classi individuate con questa procedura potrebbero anche non avere nessuna corrispondenza con elementi presenti sulla superficie terrestre. Si tratta piuttosto di *classi spettrali* che raggruppano pixel i cui *feature vector* sono vicini. Per questo motivo, la classificazione non supervisionata fornisce risultati meno soddisfacenti rispetto a quella supervisionata. Essa può effettuarsi in fase preliminare prima di una supervisione per avere un'idea di quali possono essere le principali associazioni di pixel a livello spettrale e se alcune di queste associazioni possono avere significato in termini di copertura del suolo. Per questo motivo, la *unsupervised* può essere definita anche come *classificazione esplorativa*.

## PARTE SECONDA

### Telerilevamento applicato