

CAPITOLO 5

Grandezze e leggi fondamentali del telerilevamento

Rosanna Cirone - *"Silicondev s.r.l. - Via Zoe Fontana, 220 - 00131 Roma. rosanna.cirone@silicondev.it"*

Principi e concetti fondamentali del Telerilevamento

Il Telerilevamento (Remote Sensing in inglese) è un approccio multidisciplinare allo studio del territorio e dell'ambiente. Esso consente di acquisire a distanza informazioni dettagliate sulle caratteristiche qualitative e quantitative di superfici o porzioni di territorio, e formulare ipotesi interpretative sul loro stato e sui cambiamenti e i processi dinamici da cui essi sono interessati.

L'acquisizione dei dati in Telerilevamento avviene grazie a speciali sensori che registrano le informazioni trasportate dall'energia elettromagnetica emessa, riflessa o diffusa dai corpi osservati, riuscendo a rendere "visibili" radiazioni che l'occhio umano non sarebbe altrimenti in grado di percepire.

La prospettiva di osservazione varia a seconda della piattaforma che il Telerilevamento utilizza (terra, aereo, satellite), infatti la distanza di osservazione dalla superficie indagata può essere prossima, con rilievi eseguiti ad altezze di qualche metro da terra, o estrema, grazie alle prospettive di Osservazione della Terra rese possibili a partire dagli anni '70 dall'impiego delle tecnologie satellitari per usi civili.

Da anni il Telerilevamento viene usato per studiare le masse nuvolose (meteorologia), le componenti vegetali (agronomia e studi forestali) la superficie terrestre (geologia), le acque superficiali (idrologia), i centri abitati (urbanistica).

Il processo del telerilevamento

Il Telerilevamento può essere descritto come un processo che sfrutta il diverso modo in cui le superfici naturali interagiscono con l'energia elettromagnetica proveniente da una sorgente (1) per ottenere informazioni sulle loro caratteristiche. Nel suo percorso questa energia interagisce con l'atmosfera (2) e viene modificata in funzione della concentrazione dei suoi componenti prima di raggiungere il bersaglio. L'interazione tra l'energia incidente e la superficie naturale (3) lascia una "traccia" chiamata firma spettrale (4). Le diverse firme spettrali delle varie superfici naturali vengono raccolte e misurate da sensori montati su satelliti o aerei (5) che riprendono a distanza. I dati raccolti da questi strumenti vengono elaborati (6) per ottenerne informazioni sulle caratteristiche e lo stato di salute delle superfici indagate. L'esito finale del processo è generalmente la produzione di mappe che forniscono informazioni utili per lo studio e la gestione dell'ambiente (7).

1. Sorgente di energia. Il primo requisito del telerilevamento è la presenza di una fonte di energia che illumini o fornisca l'energia elettromagnetica necessaria per illuminare la por-

zione di territorio (“scena”) che si vuole studiare. La fonte di energia può essere dunque naturale (Sole e Terra) o artificiale, come nel caso dei radar.

2. Interazione con l’atmosfera. Nel percorso che la radiazione elettromagnetica compie per raggiungere la superficie naturale, essa attraversa l’atmosfera ed entra in contatto con le particelle che la compongono, in particolare vapore acqueo, gas e polveri in sospensione. L’interazione con l’atmosfera può modificare la radiazione stessa, generando fenomeni di rifrazione o assorbimento di cui bisogna tener conto per una corretta interpretazione dei dati.
3. Interazione con le superfici naturali. L’energia elettromagnetica che a questo punto ha raggiunto la superficie viene assorbita, riemessa o riflessa a seconda delle caratteristiche fisiche della superficie, delle sue condizioni e di altri fattori.
4. Firma spettrale delle superfici. Osservando come l’interazione tra energia incidente e superficie varia nelle diverse lunghezze d’onda dell’energia elettromagnetica, se ne ricava una sorta di impronta digitale tipica della superficie, definita “firma spettrale”, che permette di distinguere da altre superfici o corpi che hanno comportamenti diversi.
5. Sensori e piattaforme di telerilevamento. Il telerilevamento usa speciali sensori in grado di misurare e registrare l’energia riflessa o emessa dalla superficie. I sensori si trovano su piattaforme poste sempre a distanza dall’oggetto studiato. Nel caso dei Radar, il sensore è anche sorgente di energia emettendo microonde. Le distanze sono variabili e possono essere prossime (da piattaforme a terra), o estreme (da satellite)
6. Trattamento dati. Il dato registrato dai sensori viene visualizzato sotto forma di immagine, che viene poi sottoposta a successivi processi di elaborazione e interpretazione al fine di estrarre le informazioni sul territorio studiato. Il prodotto finale di tale processo generalmente è una mappa tematica
7. Uso dei dati. Le informazioni ottenute alla fine del processo di telerilevamento possono così essere usate da vari utenti per differenti scopi: dall’analisi ambientale necessaria per una corretta pianificazione del territorio, alla riproduzione cartografica utile per la redazione di atlanti e carte turistiche.

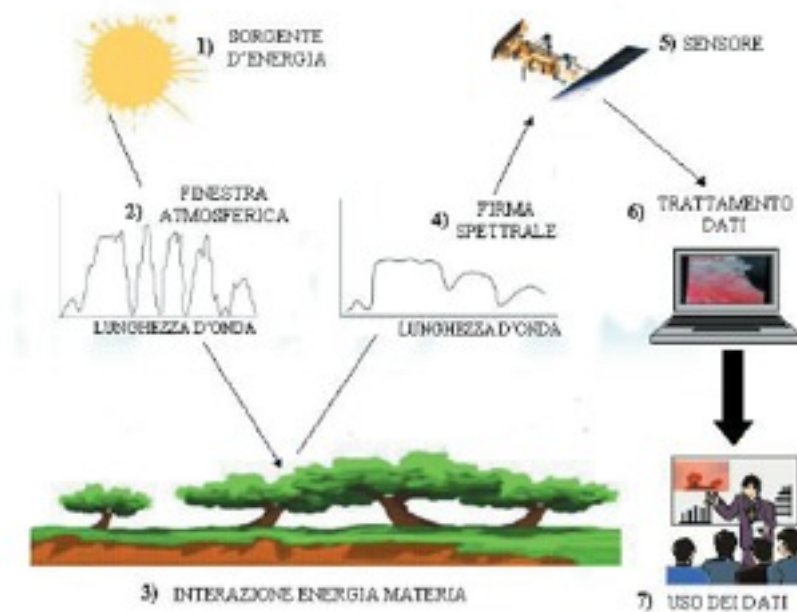


Figura 1 – Processo del Telerilevamento

La radiazione e lo spettro elettromagnetico

Per acquisire informazioni sul territorio e sull'ambiente il Telerilevamento sfrutta i fenomeni legati al mondo dell'energia elettromagnetica. È quindi utile partire da alcuni concetti fondamentali sulla fisica delle onde elettromagnetiche per comprendere i principi su cui il Telerilevamento si basa. Un ruolo particolare è svolto dalla radiazione elettromagnetica che è il mezzo che trasporta le informazioni sugli oggetti e i fenomeni indagati con le tecniche del Telerilevamento.

Il trasferimento di energia raggiante si manifesta come un'onda armonica che si propaga nello spazio, e consiste di due campi di forza, quello elettrico E e quello magnetico M , ortogonali tra loro e rispetto alla direzione di propagazione (figura. 2) Entrambi questi campi viaggiano alla velocità della luce c .

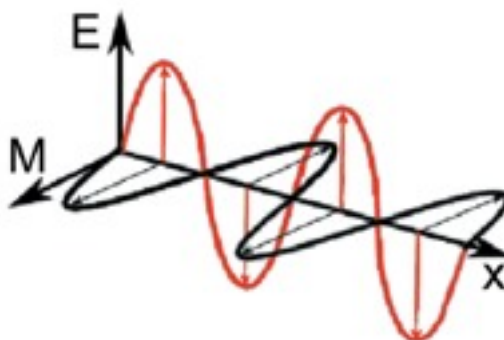


Figura 2 - I campi E e M sono ortogonali tra loro rispetto alla direzione di propagazione.

Le caratteristiche dell'onda interessanti ai fini del Telerilevamento sono due: la lunghezza e la frequenza (figura 3).

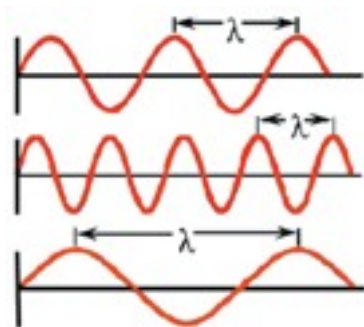


Figura 3 - L'energia elettromagnetica (EM) si propaga nello spazio mediante onde di lunghezza variabile

La lunghezza λ è la distanza che separa due picchi consecutivi di un'onda; essa è generalmente espressa in micron ($1 \mu\text{m} = 1/1.000$ di $\text{mm} = 1/1.000.000$ di metro) oppure nel suo sottomultiplo in nanometri ($1 \text{ nm} = 1/1.000.000$ di $\text{mm} = 1/1.000.000.000$ di metro).

La frequenza ν equivale invece al numero di picchi d'onda che passano in un dato punto in un certo intervallo di tempo; essa è normalmente espressa in hertz (Hz) o cicli al secondo. Il prodotto di queste due grandezze è costante e rappresenta la velocità di propagazione dell'onda:

$$c = \lambda \nu \text{ [m s}^{-1}\text{]}$$

dove c , che è la velocità della luce, vale circa 300.000 km al secondo.

Le radiazioni elettromagnetiche si distribuiscono in modo continuo lungo l'asse delle lunghezze d'onda (o delle frequenze); l'insieme di tutte queste forme di energia viene chiamato spettro elettromagnetico.

Le radiazioni vengono raggruppate convenzionalmente in regioni, o bande spettrali, che prendono il nome a seconda di alcune loro caratteristiche.

I raggi X, ad esempio, si chiamano così perché erano sconosciuti all'epoca in cui – nel 1895 – furono scoperti per caso. Alcune denominazioni dipendono invece dalla posizione che esse hanno rispetto alla porzione del visibile: è il caso dell'ultravioletto (UV) e dell'infrarosso (IR); o dalla lunghezza che hanno rispetto ad altre radiazioni: così le microonde vengono definite in questo modo perché risultano essere molto più corte – micro – rispetto alle onde radio. Le microonde ($1 \text{ mm} - 300 \text{ cm}$), con lunghezze d'onda ben più ampie del visibile e dell'infrarosso, sono rilevabili con vari strumenti, tra cui i radar. Anche le microonde vengono usate negli studi sul territorio; il loro vantaggio rispetto ad altre bande è di poter essere impiegate in qualunque condizione meteorologica, riuscendo a penetrare anche la copertura nuvolosa.

SPETTRO ELETTRIMAGNETICO



Figura 4 - Schema dello spettro elettromagnetico: i limiti tra una regione e l'altra sono convenzionali, essendo lo spettro in realtà un insieme continuo e non interrotto di onde elettromagnetiche.

Le bande dello spettro elettromagnetico maggiormente usate per gli scopi del Telerilevamento sono le seguenti:

- L'ultravioletto o UV (0,01–0,4 μm) costituito dalla radiazione elettromagnetica con lunghezze d'onda poste prima del limite inferiore del visibile (cioè prima del violetto). Anche se non possiamo percepire con i nostri occhi questa "luce" dello spettro, ci sarà capitato qualche volta di apprezzarne gli effetti: attraverso il fenomeno della fluorescenza, ad esempio. La fluorescenza altro non è, infatti, che luce visibile emessa da particolari materiali naturali, come rocce e minerali, quando questi vengono colpiti con radiazioni UV.

- Il visibile ($0,4-0,7 \mu\text{m}$) è l'unica porzione dello spettro elettromagnetico che l'occhio umano, "sensore remoto naturale", è in grado di percepire, e la percepisce come un continuo arcobaleno di colori dal viola al rosso. Il Sole emette principalmente in questa regione dello spettro, ed è proprio per questo che i nostri occhi si sono specializzati a percepire queste lunghezze d'onda. Come si può vedere nella figura 4, questa porzione è estremamente limitata rispetto al resto dello spettro; si pensi che la regione dell'infrarosso, ad esempio, è di ben 100 volte più ampia! Esistono, quindi, una quantità di radiazioni intorno a noi che sono invisibili ai nostri occhi, e che invece possono essere percepite da altri esseri viventi (come gli insetti o i serpenti) o rilevate grazie ad appositi sensori impiegati nel Telerilevamento.
- L'infrarosso, o IR, ($0,7 \mu\text{m}-1 \text{ mm}$) che ospita radiazioni con onde più lunghe rispetto a quelle del visibile, è molto ampia e viene ulteriormente suddivisa, in merito a considerazioni di tipo fisico in quattro regioni (vedi tabella 1).

<i>Regioni dello spettro</i>	<i>Lunghezza d'onda λ [μm]</i>
Infrarosso vicino	0,7–3
Infrarosso medio	3–7
Infrarosso lontano o termico	7–20
Infrarosso estremo	20–1000

Tabella 1

Le regioni dell'infrarosso sono assolutamente invisibili per l'occhio umano e sono legate ad alcuni fenomeni di interazione energia-materia. L'infrarosso lontano, ad esempio, corrisponde al mondo dell'energia radiante legata ai fenomeni termici e alla temperatura superficiale degli oggetti; per questa particolarità l'infrarosso lontano, detto anche termico, è molto utile per studiare fenomeni territoriali a carattere ambientale (vedi figura 5).

Le grandezze radiometriche

Il Telerilevamento misura l'energia proveniente da un'area osservata in una determinata unità di tempo. Questa misura è perciò quella di un flusso proprio, come la portata di un fiume rappresenta la quantità di acqua che scorre per ogni secondo attraverso una determinata sezione. Per definire in termini quantitativi questo flusso di energia, si usano così delle grandezze radiometriche.

Le grandezze radiometriche che si utilizzano in Telerilevamento sono quindi tutte espressioni specifiche di flusso radiante Φ che equivale ad una potenza, e cioè energia nell'unità di tempo.

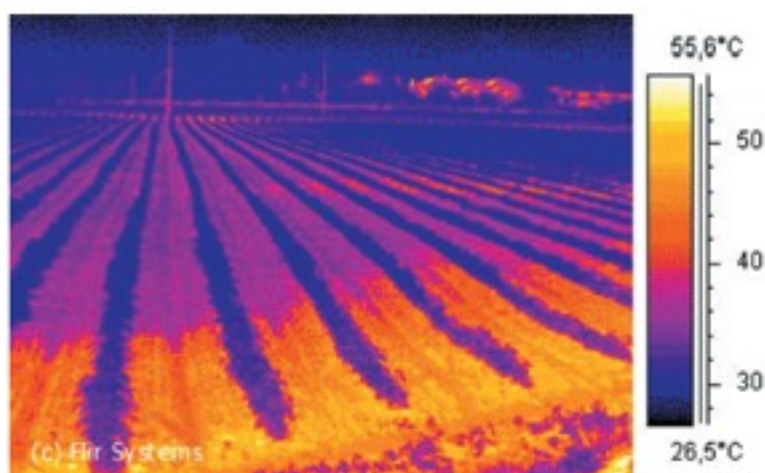


Figura 5 - Un esempio di applicazione dell'IR Termico per lo studio di fenomeni ambientali è rappresentato dalla valutazione della corretta irrigazione di vasti campi agricoli per stabilire l'efficacia degli impianti di irrigazione. Nella foto una termografia di un campo agricolo in cui il colore indica la maggiore o minore presenza di acqua nel terreno: le zone in viola sono quelle con temperature più basse dovute ad una maggiore umidità del suolo.

Il flusso radiante Φ si propaga nello spazio in tutte le direzioni e quindi si avranno delle definizioni diverse a seconda se si considera relativo ad una certa area A o si tiene conto di una determinata geometria di osservazione. Si parlerà quindi di irradianza E (densità di flusso radiante incidente), exitanza M (densità di flusso radiante in uscita), radianza L (densità di flusso radiante calcolata secondo la geometria di osservazione).

La grandezza per eccellenza in Telerilevamento è rappresentata dalla radianza L , cioè quel flusso calcolato in base alla geometria della ripresa.

• Potenza (Flusso radiante) $\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad [W]$ Dove Q equivale alla quantità di energia e t all'unità di tempo • Irradianza (Densità di flusso radiante incidente) $E = \frac{d\Phi}{dA} \quad [W m^{-2}]$ Dove A equivale all'area su cui incide il flusso e Φ è il flusso radiante • Exitanza (Densità di flusso radiante in uscita) $M = \frac{d\Phi}{dA} \quad [W m^{-2}]$ Dove A è l'area da cui proviene l'energia • Radianza $L = d \left(\frac{d\Phi}{dA \cos \theta} \right) \cdot \frac{1}{d\omega} = \frac{d^2 \Phi}{dA \cos \theta d\omega} \quad [W m^{-2} sr^{-1}]$ Dove θ è l'angolo compreso tra il flusso radiante in uscita e la normale al piano (n), e ω è l'angolo compreso fra il flusso radiante in uscita e la superficie.	
--	--

Quando queste grandezze si relazionano al variare della lunghezza d'onda (λ), il loro significato diventa spettrale, e si avranno le seguenti nuove relazioni:

• Flusso radiante spettrale	
$\Phi_{\lambda} = \frac{d\Phi}{d\lambda}$	$[\text{W } \mu\text{m}^{-1}]$
• Densità di flusso radiante spettrale incidente	
$E_{\lambda} = \frac{dE}{d\lambda}$	$[\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}]$
• Densità di flusso radiante spettrale in uscita	
$M_{\lambda} = \frac{dM}{d\lambda}$	$[\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}]$
• Radianza spettrale	
$L_{\lambda} = \frac{dL}{d\lambda}$	$[\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}]$

Il Corpo Nero

Un oggetto che è in grado di assorbire tutta la radiazione che lo investe e che emette tutta l'energia ricevuta alle varie lunghezze d'onda si definisce corpo nero, o radiatore integrale.

Un tale oggetto quindi non riflette nulla e pertanto lo si può ben immaginare come nero. In realtà in natura nessun oggetto si comporta integralmente come corpo nero, però alcune superfici naturali presentano tali caratteristiche in alcune porzioni di spettro, per esempio gli oggetti che ci appaiono neri nel visibile.

Sorgenti naturali di energia: il Sole e la Terra

Ogni superficie fisica che si trovi a una temperatura T superiore allo 0°K Kelvin (equivalente ad una temperatura di $-273,14^{\circ} \text{C}$) emette energia sotto forma di radiazione elettromagnetica.

Le sorgenti di energia che maggiormente regolano i fenomeni naturali che ci circondano sono la Terra ed il Sole.

Dal punto di vista dell'irraggiamento, dunque, queste due sorgenti si comportano in modo assai diverso a causa della loro diversa temperatura.

Bisogna però ricordare che la superficie terrestre subisce l'interazione con l'energia solare che incide su di essa. L'energia del sole viene assorbita dalle piante, per la fotosintesi, si trasmette all'interno dei corpi idrici dei mari e dei laghi, dove viene assorbita, e si trasforma in calore, oppure viene riflessa dai corpi. Questi fenomeni di assorbimento, trasmissione e riflessione variano in funzione delle caratteristiche della superficie terrestre.

Sole e Terra hanno due massimi di emissione molto diversi, rispettivamente di $9,66$

μm e di $0,483 \mu\text{m}$ (Legge di Wien). Nonostante i massimi di emissione delle due sorgenti siano molto diversi, bisogna ricordare che il Sole emette lungo tutto lo spettro (Legge di Plank). In poche parole, se vogliamo adesso usare uno strumento per misurare l'energia emessa dalla Terra

dovremo allora stare attenti a non comprendere nella nostra misura, l'energia riflessa dal Sole, e viceversa.

Esiste perciò una banda – fra i 3 ed i 7 μm di lunghezza d'onda, chiamata IR medio – in cui si verifica una certa ambiguità: l'energia infrarossa mediamente emessa dalle superfici naturali é qui confrontabile con quella solare mediamente riflessa dalle medesime: un rilievo effettuato in questa banda necessita quindi di una interpretazione più accurata per distinguere se l'energia misurata corrisponda a quella solare riflessa o a quella emessa dalla Terra. In conclusione, i nostri occhi osservano per lo più il risultato dell'energia riflessa dal Sole o da altre sorgenti di illuminazione artificiale (ad esempio una lampada o un flash), oppure quella emessa da altri corpi posti ad alte temperature (stelle, corpi incandescenti), il cui spettro cade parzialmente o totalmente nella regione del visibile. Mentre l'energia emessa da altri corpi a temperatura ambiente risulta invece assolutamente invisibile, cadendo completamente, o per lo più, nelle regioni dell'infrarosso.

Quindi, paradossalmente vediamo per merito del Sole, ma i nostri occhi non riescono a percepire l'energia emessa della Terra!

I fenomeni di interazione elettromagnetica

Quando ci riferiamo al mondo reale osservato attraverso gli strumenti del Telerilevamento, bisogna tener conto di due fenomeni che interagiscono con la radiazione elettromagnetica:

- l'influenza dell'atmosfera, che è il mezzo che la radiazione elettromagnetica attraversa durante il suo percorso dalla sorgente al sensore
- il comportamento delle superfici naturali che possono riflettere, assorbire o trasmettere la radiazione.

Influenza dell'atmosfera

L'atmosfera é di particolare interesse in Telerilevamento, in quanto é il mezzo attraverso cui l'energia elettromagnetica viaggia nel suo percorso dalla sorgente al bersaglio e quindi al sensore. Le particelle solide o liquide sospese nell'aria (gas e aerosol), ad esempio, assorbono e diffondono le onde elettromagnetiche modulando ed alterando il segnale che raggiunge il sensore rispetto alla radianza originale proveniente dal bersaglio oggetto di studio. Tale fenomeno (effetto atmosferico) evidentemente influenza e modifica l'informazione rilevata, per cui occorrono specifici procedimenti di correzione e modelli interpretativi per ricondurre il dato ad un margine più sicuro di attendibilità.

I gas atmosferici, gli aerosol ed i vapori interagiscono diversamente con la radiazione solare, mettendo in campo due comportamenti principali:

- l'assorbimento che riduce la quantità di energia incidente;
- la diffusione (scattering) che, al contrario, ridistribuisce la radiazione in arrivo cambiando la direzione di propagazione.

L'assorbimento

Il fenomeno di assorbimento riguarda soprattutto i gas presenti nell'atmosfera: il vapore acqueo, l'anidride carbonica, l'ossigeno e l'ozono. Esistono alcune regioni dello spettro elettromagnetico, dette "finestre atmosferiche", dove la radiazione viene trasmessa meglio che altrove, e dove le caratteristiche dei gas permettono il passaggio della radiazione.

Le finestre di trasparenza più importanti sono quelle del:

- visibile (0,4–0,7 mm),
- infrarosso vicino (0,7– 1,3 mm; 1,5–1,8 mm; 2– 2,6 mm),
- infrarosso medio (3–5 mm),
- infrarosso termico (8–14 mm)
- delle microonde (1 mm–1 m).

La conoscenza delle finestre di trasparenza dell'atmosfera si rivela fondamentale quando si devono studiare dei fenomeni particolari e quando occorre definire le caratteristiche dei sensori, per progettare gli strumenti di osservazione e misura.

La diffusione

La diffusione (o scattering) si ha quando la radiazione, nell'impatto con le particelle costituenti l'atmosfera, viene deviata in modo differente nelle varie direzioni.

La modalità di diffusione dipende da molti fattori, tra cui la lunghezza d'onda della radiazione incidente, la quantità di particelle o gas presenti nell'atmosfera e la distanza che la radiazione percorre attraverso l'atmosfera. In generale, la diffusione é responsabile dell'effetto foschia e delle diverse colorazioni del cielo. Questi effetti sono più evidenti nel visibile e nell'infrarosso, mentre sono praticamente trascurabili nel dominio delle microonde.

L'interazione della radiazione con le superfici naturali

Quando la radiazione elettromagnetica, dopo aver attraversato l'atmosfera, colpisce una superficie, a seconda della natura fisica e del grado di rugosità di questa, sono possibili tre meccanismi di interazione:

1. una parte del flusso radiante incidente Φ_i viene riflessa Φ_r ,
2. una parte viene assorbita Φ_a ,
3. e infine la restante viene trasmessa Φ_t .

In Telerilevamento questi meccanismi vengono descritti con dei coefficienti specifici detti rispettivamente:

coefficiente di riflessione o riflettività	$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i}$
coefficiente di assorbimento o assorbività	$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_i}$
coefficiente di trasmissione o trasmissività	$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$

esprimibili, per il principio di conservazione dell'energia, nella semplice relazione:

$$a + \rho + \tau = 1 \quad \text{con} \quad \begin{matrix} 0 < a < 1 \\ 0 < \rho < 1 \\ 0 < \tau < 1 \end{matrix}$$

Per comprendere meglio questo fenomeno, basta ricordare ciò che accade ad un'automobile di colore nero che rimane esposta per un'intera giornata al rovente sole estivo. A causa del suo colore scuro, l'auto riflette poca luce e quindi assorbe tanta energia solare riemettendola sotto forma di calore. Questo spiega come mai, alla fine della giornata, l'abitacolo dell'auto sarà talmente caldo da non consentire di toccare neanche il volante.

La riflessione

Il fenomeno della riflessione dipende dalla natura e dalla rugosità della superficie rispetto alla lunghezza d'onda incidente.

Si può avere una riflessione speculare, per cui un oggetto liscio riflette tutta l'energia in una direzione precisa che è definita dall'assetto geometrico della superficie, o una riflessione diffusa, nel caso di una superficie rugosa dove l'energia viene più o meno uniformemente riflessa in tutte le direzioni. In questo ultimo caso, si parla allora di superfici lambertiane.

La maggior parte delle superfici ha un comportamento intermedio fra i due estremi, e la riflessione diffusa è responsabile del colore dei corpi naturali che osserviamo tutti i giorni: ad esempio, il verde delle foglie degli alberi, il rosso o il giallo dei fiori.

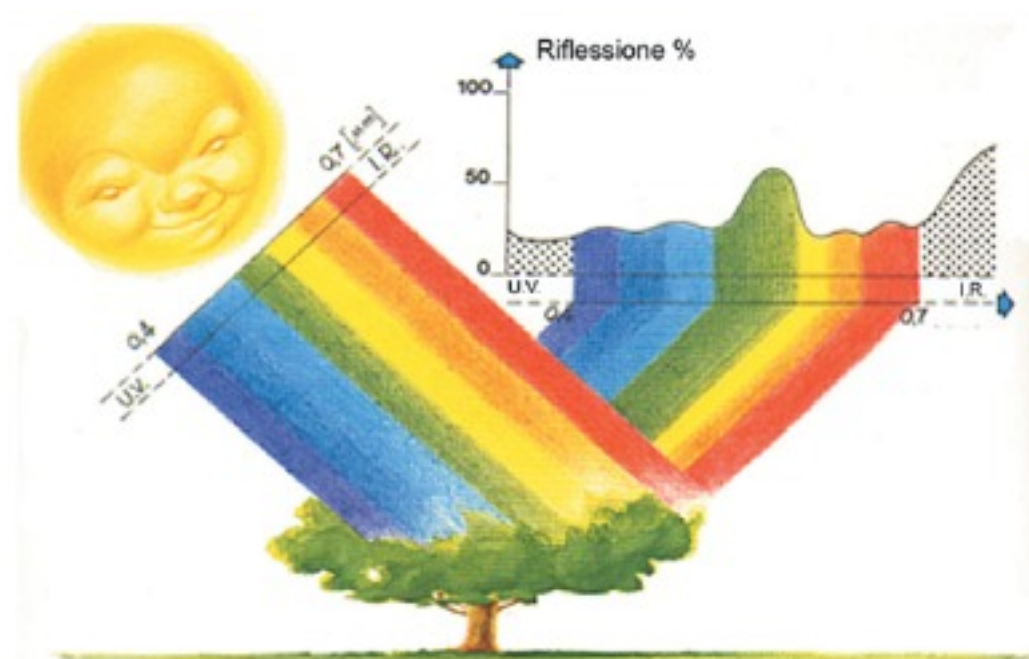


Figura 6 - Il colore verde delle foglie dipende dalla maggiore riflettività nel verde rispetto alle altre lunghezze d'onda del visibile.

La trasmissione

Questo fenomeno interessa, come dice la parola, i corpi che mostrano un accentuato valore di trasmissività, come l'acqua e l'atmosfera, oltre a materiali artificiali come il vetro.

Il caso del vetro è interessante anche per mostrare come la trasmissione possa essere rilevante in certe lunghezze d'onda, e non in altre: tale materiale è infatti assolutamente trasparente nel visibile, ma nel contempo assolutamente opaco nell'infrarosso, per cui risulta un ottimo isolante termico. Uno degli effetti di questo fenomeno è il riscaldamento che si ottiene in una serra per i fiori (vedi figura . 7).

Il vetro permette la trasmissione dell'energia ad onde corte, che viene prima assorbita all'interno e poi riemessa sotto forma di onde lunghe; queste, non riuscendo più a liberarsi verso l'esterno, determinano un aumento progressivo della temperatura dell'ambiente interno alla serra.

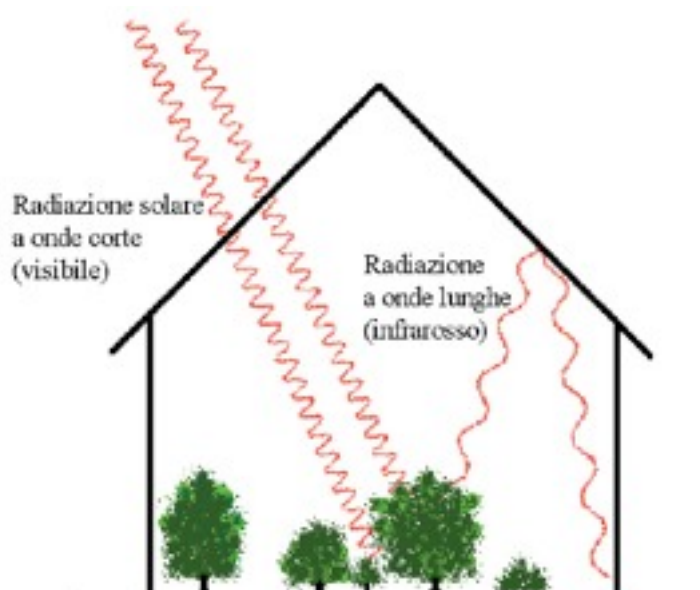


Figura 7 - L'effetto serra non è altro che un processo naturale dovuto al diverso comportamenti di alcuni gas atmosferici nei confronti della radiazione: trasparenti ad onde corte e schermanti a onde lunghe.

L'acqua, invece, è trasparente solo alle lunghezze d'onda più corte della porzione del visibile dello spettro (luce, blu, verde), mentre assorbe le lunghezze d'onda più lunghe dal rosso all'infrarosso. Per questa ragione solo le lunghezze d'onda corte del blu raggiungono la profondità dei corpi idrici.

L'emissione

In Telerilevamento si fissa attorno a $3\text{ }\mu\text{m}$ il limite superiore della porzione di energia solare riflessa dalla superficie terrestre rilevabile, che è anche il limite tra l'infrarosso medio e vicino.

Oltre questa soglia e fino a $14\text{ }\mu\text{m}$ l'energia rilevabile è prodotta essenzialmente dal fenomeno dell'emissione. In particolare, nella regione tra 8 e $14\text{ }\mu\text{m}$, si rileva essenzialmente l'energia emessa dai corpi a temperatura ambiente ($15\text{-}23^{\circ}\text{C}$).

Un esempio di applicazione in Telerilevamento basata sulla misurazione dell'energia emessa da corpi o superfici è la termografia, in quanto permette di registrare valori di temperatura ed emissività.

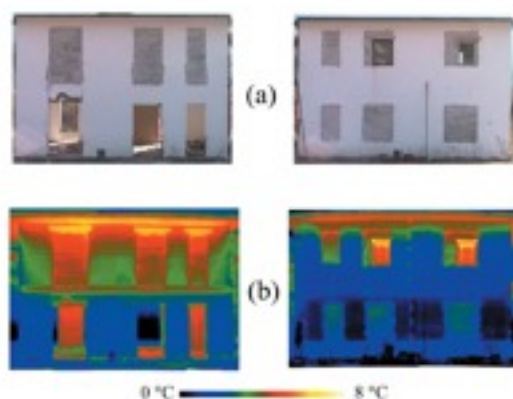


Figura 8 - Le due immagini (a) riprendono due abitazioni simili; le immagini sottostanti (b) sono ottenute attraverso termografia ed evidenziano le differenze delle due abitazioni dal punto di vista termico; nella casa di sinistra la temperatura è superiore per la mancanza del rivestimento isolante; in quella di destra la presenza del rivestimento determina temperature inferiori

La firma spettrale delle superfici

Gli accenni alla fisica delle onde elettromagnetiche ci hanno aiutato ad intuire che ogni superficie, a seconda delle proprietà fisiche, delle caratteristiche della radiazione incidente e di altri fattori, riemette, assorbe o riflette le radiazioni elettromagnetiche in maniera diversa nelle varie lunghezze d'onda. Si tratta di un comportamento così caratteristico da rappresentare un'impronta digitale di una superficie, una vera e propria 'firma' di tale oggetto, che viene perciò chiamata firma spettrale. Così, osservando l'energia riflessa nelle varie lunghezze d'onda se ne ricava una curva di riflettività, detta appunto firma spettrale di riflettività, che permette di distinguere una superficie dalle altre superfici o corpi che hanno comportamenti diversi.

Firme Spettrali: la vegetazione

La curva di riflettanza della vegetazione può variare in funzione di molti fattori, quali il tipo di vegetazione e la sua densità, lo stadio fenologico, il contenuto di acqua. La clorofilla, un pigmento presente nelle cellule vegetali, assorbe ai fini della fotosintesi la radiazione visibile blu e rossa, riflettendo invece quella verde. Le foglie ci appaiono più verdi in estate quando il contenuto di clorofilla è molto alto. In autunno la clorofilla è presente in quantità minori, quindi il fenomeno di assorbimento delle radiazioni rossa e blu diminuisce, mentre aumenta quello della riflessione in tutto l'intervallo del visibile, facendo apparire le foglie secche rosse o gialle (il giallo è la combinazione di radiazioni verdi e rosse). La struttura interna della foglia invece influisce sulla riflessione della radiazione infrarossa nell'intervallo compreso tra 0,7 e 1,35 mm: nell'infrarosso vicino una foglia sana in questa porzione dello spettro elettromagnetico si comporta da alto riflettore di energia (50% - 70%). La misura e il monitoraggio della quantità di energia riflessa nell'intervallo dell'infrarosso vicino viene perciò usata per determinare lo stato di salute della vegetazione.

Tra 1,35 e 2,70 mm, invece, le proprietà spettrali della vegetazione dipendono strettamente dal contenuto in acqua della foglia. In condizioni di stress idrico, si ha un innalzamento dei valori di radiazione riflessa.

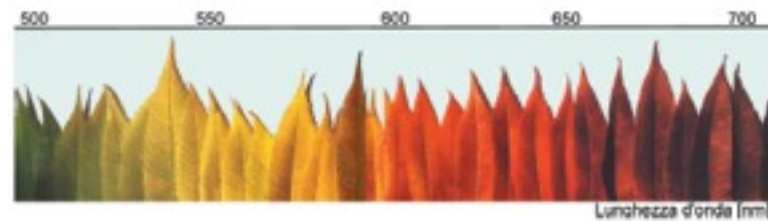


Figura 9 - Il colore delle foglie di alcuni alberi descrive perfettamente lo spettro di riflessione dal verde al rosso, in relazione alla concentrazione della clorofilla presente e quindi all'efficienza del processo di sintesi.

Firme Spettrali: l'acqua

Fra gli ambienti che è possibile riconoscere grazie agli strumenti del Telerilevamento l'acqua, nei suoi vari stati (gassoso, liquido e solido) riveste senza dubbio un ruolo particolare.

Ciò in base al suo particolare comportamento spettrale che generalmente contrasta con gli altri elementi del paesaggio al contorno. Ed anche perché questo elemento, insieme all'atmosfera, non è propriamente un corpo opaco, almeno per le bande del visibile; al contrario il coefficiente di trasmissività τ per un corpo idrico è piuttosto elevato, almeno per i primi 10-20 metri di spessore, che vengono perciò definiti zona eufotica o di penetrazione della luce.

Se consideriamo un flusso radiante che penetra in acqua, si hanno gli stessi fenomeni di interazione già descritti per l'atmosfera, principalmente di trasmissione e di diffusione (o scattering), mentre la riflessione è normalmente molto bassa: questo comportamento varia in funzione dei diversi componenti presenti. L'acqua pura è perfettamente trasparente nel visibile, anche se in natura non esiste, presentandosi invece in combinazione con varie sostanze, fra cui alcune sono maggiormente responsabili della risposta radiometrica misurata. Un ruolo particolare è svolto dalla presenza di particelle più o meno fini in sospensione fra cui: la clorofilla, il carico sospeso inorganico e organico, il fitoplancton.

La risposta spettrale dell'acqua varia con la lunghezza d'onda: l'acqua limpida assorbe maggiormente le radiazioni più lunghe del visibile e dell'infrarosso, mentre diffonde le lunghezze d'onda più corte; per questo motivo l'acqua ci appare blu o blu-verde, avendo il valore massimo di trasmissività a 450 nm, nel blu.

Firme Spettrali: il Suolo

La riflettanza dei suoli dipende dalla loro composizione chimica e fisica, che ne determina il colore superficiale, utile indicatore del tipo di suolo e delle sue proprietà. Il suolo presenta caratteri specifici legati alla sua natura ed origine e a fattori ambientali che ne influenzano la composizione. Dal punto di vista spettrale le caratteristiche del suolo più interessanti dipendono dal contenuto in sostanza organica, ossidi di ferro, sali e carbonati, umidità, tessitura e struttura. Tali caratteristiche modificano la risposta del suolo singolarmente oppure in sinergia. Infatti mentre alcuni fattori, come l'humus o i carbonati, influenzano direttamente il colore del suolo, gli altri parametri non incidono sul comportamento spettrale, bensì sull'intensità del dato telerilevato.

Ciò che si deduce osservando il grafico relativo alla risposta spettrale generica dei suoli è che la loro riflettanza aumenta all'aumentare della lunghezza d'onda e presenta delle diminuzioni proporzionali al contenuto di umidità in corrispondenza delle lunghezze d'onda di assorbimento dell'acqua (1,4, 1,9 e 2,7 mm). Un suolo umido ha in generale una riflettanza più bassa rispetto ad un suolo asciutto.

Il colore: dalla percezione soggettiva dell'uomo alle misure quantitative del telerilevamento

L'occhio, sensore naturale dell'uomo, utilizza il colore come uno dei fattori chiave del riconoscimento. Allo stesso modo, anche i sensori artificiali usati nel Telerilevamento usano il colore, inteso come il risultato della radiazione emessa o riflessa dalle superfici, quale informazione sulle loro caratteristiche.

Anche se, come abbiamo più volte detto, il colore rilevato dai sensori va oltre il limitato spettro del visibile del nostro occhio. Vale quindi la pena di soffermarsi, a questo punto, sul concetto di colore e sui meccanismi che permettono di percepirlo, riprodurlo e misurarlo.

Il sistema occhio-cervello.

Il funzionamento dell'occhio umano può essere paragonato a quello di una macchina fotografica, anche se sarebbe più corretto dire l'inverso.

La cornea e il cristallino fungono da lenti naturali: in mezzo ad esse si trova l'iride, il cui colore determina proprio la diversa colorazione degli occhi. Al centro dell'iride la pupilla, che ha la stessa funzione del diaframma in una macchina fotografica, si stringe e si dilata a seconda dell'intensità di luce che la colpisce.

La funzione del cristallino è quella di far convergere i raggi luminosi (immagini) sulla retina, così come avviene sulla pellicola di una macchina fotografica.

La retina riveste quasi tutta la parte interna dell'occhio formata da milioni di cellule, detti fotorecettori, sensibili alla luce, che effettuano la trasformazione degli stimoli visivi in impulsi elettrici, che poi raggiungono il cervello attraverso il nervo ottico. I fotorecettori presenti sulla retina sono divisi in coni e bastoncelli.

I coni si trovano prevalentemente al centro della retina e consentono la visione diurna, adattandosi meglio alla luce e percependo meglio i colori.

I bastoncelli sono prevalentemente alla periferia e permettono la visione notturna, essendo molto più sensibili alla luce rispetto ai coni.

Misurazione del colore

La percezione umana del colore è un fenomeno del tutto soggettivo influenzato da molti fattori, tra cui la condizione emotiva del momento.

Per superare perciò il limite della soggettività della visione umana e per fornire i dati fondamentali per la riproduzione delle immagini è necessario possedere strumenti in grado di misurare il

colore ovvero l'energia elettromagnetica che proviene da una determinata superficie alle diverse lunghezze d'onda.

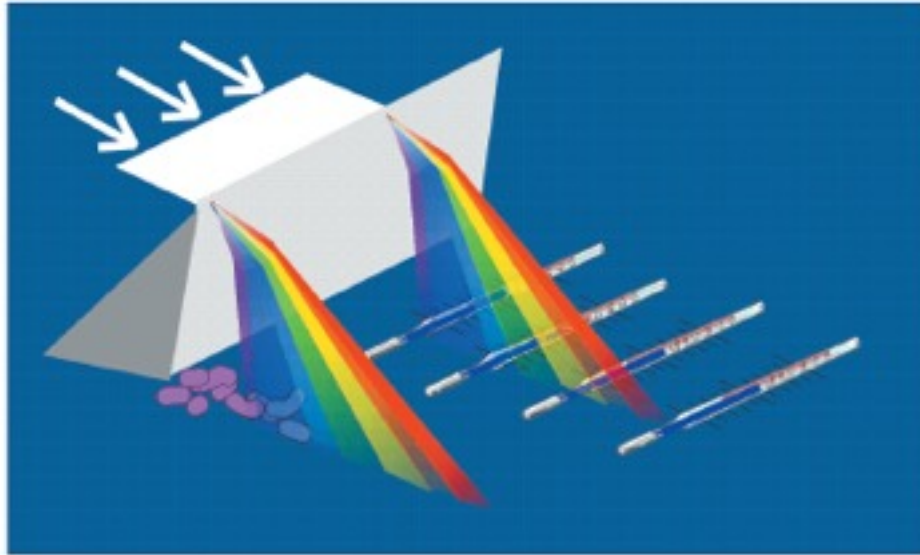


Figura 10 - Posizionando dei termometri alle estremità dello spettro del visibile, cioè prima del blu e dopo il rosso, è possibile misurare anche l'energia di "colori" che non vediamo, cioè l'ultravioletto e l'infrarossi

Per capire come funzionano gli strumenti del Telerilevamento, ripercorriamo l'esperienza che ha permesso di scoprire l'esistenza della luce Ultravioletta e dell'Infrarosso.

Usando un prisma di Newton, siamo in grado di separare la luce bianca proveniente dal Sole nelle sue componenti monocromatiche corrispondenti ai colori dello spettro del visibile che vanno dal blu al rosso in rapporto alla diversa lunghezza d'onda.

Questa operazione è esattamente quello che fanno i vari sensori usati nel Telerilevamento, che sono provvisti di filtri monocromatici in grado di selezionare solo alcune regioni dello spettro. A questo punto se poniamo dei termometri a distanza regolati lungo il piano dove viene scomposta la luce, potremo misurare l'energia che accompagna le diverse lunghezze d'onda lungo l'arcobaleno creato dal prisma. Se poniamo i termometri anche prima del blu e dopo il rosso, misureremo così anche l'energia rispettivamente dell'ultravioletto e dell'infrarosso. Al posto dei termometri, negli strumenti del Telerilevamento si usano sensori sofisticati in grado di convertire in segnale elettrico la radiazione che li colpisce, ma il principio è lo stesso. Per misurare i colori, ma anche la radiazione oltre il visibile è necessario prima scomporre la luce e poi "quantificare" l'intensità della radiazione per la porzione spettrale di interesse.

Strumenti e dati del Telerilevamento

Nel corso della sua storia, l'uomo ha sempre cercato nuovi modi per superare i suoi limiti naturali di osservazione e di percezione visiva, per riuscire a scrutare oltre il muro, la collina, la montagna. Il Telerilevamento (TLR) può essere considerato una tappa di questo cammino dell'uomo verso una visione più completa e complessiva dell'ambiente in cui vive.

Sfruttando le conoscenze dei fenomeni d'interazione tra energia elettromagnetica e superfici naturali, tale disciplina permette di abbracciare con un solo sguardo vaste aree di territorio e di rappresentarlo su piccola scala attraverso immagini e mappe estremamente dettagliate, che si rivelano utili per moltissimi scopi.

Tutto ciò è possibile, in particolare, grazie all'uso di piattaforme (come aerei o satelliti) che consentono di riprendere a distanza più o meno ravvicinata il territorio, e di sensori che ne scrutano le caratteristiche e le condizioni.

Caratteristiche e peculiarità del telerilevamento

In Telerilevamento l'osservazione del territorio è possibile grazie alla ripresa a distanza e all'uso di sensori. Le caratteristiche principali sono:

- **Visione a distanza:** il TLR consente di riprendere a distanza vasti territori, anche quelli posti in zone remote ed inaccessibili (ad esempio, i ghiacciai, i deserti); senza un contatto diretto ed un intervento invasivo su essi (si pensi alla possibilità di controllare lo stato di salute di una foresta senza dover raccogliere campioni delle sue foglie).
- **Misura con i sensori:** il TLR fa uso di sensori che permettono di vedere cose che ad occhio nudo non saremmo in grado di distinguere, discriminando in un'immagine un gran numero di elementi (suolo, vegetazione, acqua, ecc.) e riconoscendo le loro caratteristiche (umidità, stato di salute, concentrazione dei nutrienti, ecc.).
- **Ripresa sinottica:** la ripresa a distanza offre una prospettiva di visione di estese porzioni di territori: possiamo così seguire il percorso di un fiume che attraversa vari paesi; osservare la diversa distribuzione delle colture agricole in territori differenti; controllare la diffusione degli incendi di un intero continente o monitorare le condizioni di vaste distese oceaniche.
- **Ripresa multispettrale:** la visione a colori dell'uomo è limitata perché permette di osservare solo una piccola parte del comportamento spettrale degli oggetti che avviene sempre lungo tutto lo spettro elettromagnetico. Il telerilevamento, invece, osserva il comportamento delle superfici in varie porzioni dello spettro, riprese dalle bande dei sensori, riuscendo così a distinguere in un territorio tipologie e stato delle superfici e degli oggetti che lo compongono.
- **Ripresa multitemporale:** le tecniche di telerilevamento consentono di riprendere la stessa scena ad intervalli di tempo diversi e regolari. Questo è particolarmente interessante se si è interessati a monitorare fenomeni naturali con un andamento dinamico, come l'evoluzione meteorologica, lo scioglimento dei ghiacciai, il ciclo vegetativo delle colture, o fenomeni devastanti connessi all'attività umana, come la deforestazione di alcune aree del pianeta.

Uno degli aspetti più importanti che fanno del Telerilevamento uno strumento utile per il monitoraggio dell'ambiente e del territorio è la possibilità di effettuare riprese multiple, ovvero con

diverse risoluzioni spaziali, con differenti caratteristiche spettrali e di acquisire i dati in momenti diversi.

Combinando insieme i diversi strumenti, sensori e mezzi è possibile realizzare un monitoraggio dell'ambiente e del territorio che ne riesca a cogliere tutta la complessità.

Come abbiamo visto, il Telerilevamento si basa sull'acquisizione di dati a distanza ovvero sulla misurazione dell'energia elettromagnetica, emessa o riflessa, dalle superfici osservate senza un diretto contatto con queste. A seconda della distanza e delle caratteristiche dello strumento è possibile indagare differenti aspetti legati al territorio. Gli strumenti del Telerilevamento vengono montati su apposite piattaforme che in funzione della prospettiva e della quota di osservazione vengono distinte in: piattaforme da terra, da aereo da satellite.

Strumenti misura dell'energia, le bande e la visione multispettrale

Ogni oggetto (superficie) è caratterizzato da una propria impronta spettrale in funzione della peculiare interazione con la radiazione elettromagnetica. Proprio grazie alla misura dell'energia emessa o riflessa dalle superfici, registrata da appositi sensori nelle diverse lunghezze d'onda, è possibile distinguere in un territorio le differenti tipologie (un corpo idrico da un campo agricolo, da un affioramento roccioso, ecc.) e lo stato delle superfici e degli oggetti che lo compongono (qualità delle acque del corpo idrico, stato della vegetazione nei campi, presenza di determinati minerali nelle rocce, ecc.).

Una delle peculiarità che rendono il Telerilevamento una tecnica molto versatile e fortemente utilizzata per l'osservazione della terra, è la possibilità di analisi multispettrale ovvero la capacità di acquisire più immagini contemporaneamente una per ogni porzione spettrale acquisibile dal sensore e poi interpretare, uno stesso oggetto in diverse lunghezze d'onda.

Queste porzioni spettrali, definite da un valore inferiore e da uno superiore di lunghezze d'onda, vengono chiamate bande spettrali. L'acquisizione d'immagini in diverse bande consente perciò di analizzare differenti proprietà delle superfici indagate proprio per le specifiche risposte che esse danno in differenti porzioni dello spettro.

Il Telerilevamento utilizza strumenti in grado di misurare la radiazione elettromagnetica proveniente da un corpo nelle varie lunghezze d'onda.

Questi strumenti prendono il nome di radiometri. I radiometri in genere misurano l'energia radiante relativa a una sola regione spettrale oppure sono in grado di funzionare simultaneamente in varie bande dello spettro (radiometri multispettrali).

I dati ottenuti dai radiometri sono valori numerici di radianza, relativa alla superficie in esame, sulla lunghezza d'onda indagata.

Sistemi attivi e passivi

I sensori impiegati in Telerilevamento si suddividono in due grandi gruppi: Attivi e Passivi.

Il gruppo dei sensori attivi è quello che oltre a registrare l'energia elettromagnetica proveniente dalle superfici, produce esso stesso l'energia necessaria per illuminare la scena da riprendere. Si

pensi ad una macchina fotografica che utilizza il flash per “attivare” la scena da riprendere. Tipici sistemi attivi d’osservazione della terra sono il radar ed il lidar che inviano un fascio di radiazioni, e poi registrano il segnale di ritorno dopo che questo ha interagito, ed è perciò stato modificato, dalla superficie indagata.

Gli strumenti che non emettono energia propria, ma sfruttano esclusivamente la radiazione naturale di altre sorgenti luminose sono definiti passivi; esempi di sensori passivi sono i radiometri, che misurano l’energia proveniente da sorgenti esterne (il sole nella banda del visibile, la terra nelle bande dell’infrarosso termico e delle microonde). Usando sempre l’esempio della macchina fotografica, quando questa opera senza flash si comporta come un sistema di rilevamento passivo.

Sensori ottici

I sensori ottici per il telerilevamento passivo che operano nel visibile o nell’infrarosso sono costituiti principalmente, da un sistema ottico di ripresa, da un sensore elettro-ottico e da un convertitore analogico digitale. Il sistema ottico ha la funzione di focalizzare la radiazione ricevuta dalla superficie osservata sulla superficie del sensore vero e proprio.

Questo a sua volta è un sistema elettro-ottico che ha il compito di convertire la potenza elettromagnetica che lo investe in un segnale elettrico di caratteristiche opportune. Il segnale così ottenuto viene successivamente digitalizzato dal sistema di conversione A/D.

Bibliografia

- P.A. Brivio; G.M. Lechi, E. Zilioli, *Principi e metodi di Telerilevamento*, 1a ed, UTET Università, 2006
- Mario A. Gomarasca, *Introduzione a telerilevamento e GIS per la Gestione delle Risorse Agricole e Ambientali*, Edizioni Associazione Italiana di Telerilevamento