

MINISTERO DELL'ISTRUZIONE, DELL'UNIVERSITÀ E DELLA RICERCA

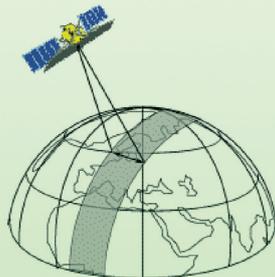
DIPARTIMENTO PER LA PROGRAMMAZIONE IL COORDINAMENTO E GLI AFFARI ECONOMICI

SERVIZIO PER LO SVILUPPO E IL POTENZIAMENTO DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA (SSPAR)

PNR 2001-2003 (FIRB art.8) D.M. 199 Ric. Del 8 marzo 2001

Collana

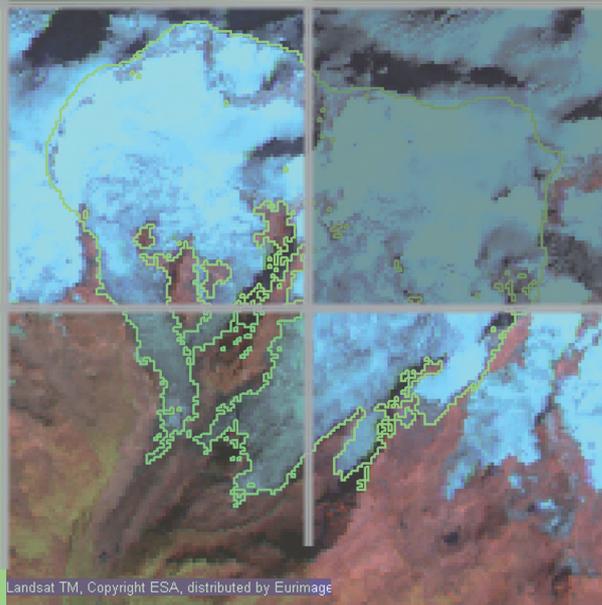
“DIFFUSIONE E SPERIMENTAZIONE DELLA CARTOGRAFIA,
DEL TELERILEVAMENTO E DEI SISTEMI INFORMATIVI GEOGRAFICI,
COME TECNOLOGIE DIDATTICHE APPLICATE ALLO STUDIO
DEL TERRITORIO E DELL'AMBIENTE”



TELERILEVAMENTO



3



Landsat TM, Copyright ESA, distributed by Eurimage

MIRCO BOSCHETTI, LUCIO BOLZAN, MARIANO BRESCIANI. CLAUDIA GIARDINO, ALBA L'ASTORINA,
RICCARDO LANARI, MICHELE MANUNTA, EMANUELA MAURI, EUGENIO ZILIOLI†

MINISTERO DELL'ISTRUZIONE, DELL'UNIVERSITÀ E DELLA RICERCA

DIPARTIMENTO PER LA PROGRAMMAZIONE IL COORDINAMENTO E GLI AFFARI ECONOMICI

SERVIZIO PER LO SVILUPPO E IL POTENZIAMENTO DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA (SSPAR)

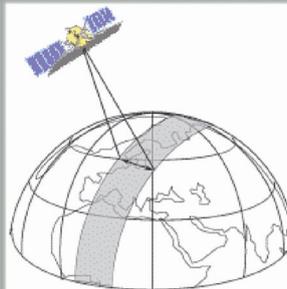
PNR 2001-2003 (FIRB art.8) D.M. 199 Ric. Del 8 marzo 2001

Collana

“DIFFUSIONE E SPERIMENTAZIONE DELLA CARTOGRAFIA,
DEL TELERILEVAMENTO E DEI SISTEMI INFORMATIVI GEOGRAFICI,
COME TECNOLOGIE DIDATTICHE APPLICATE ALLO STUDIO
DEL TERRITORIO E DELL'AMBIENTE”

3

TELERILEVAMENTO



Copyright © 2005

MINISTERO DELL'ISTRUZIONE, DELL'UNIVERSITÀ E DELLA RICERCA
Dipartimento per la Programmazione il Coordinamento e gli Affari Economici
Servizio per lo Sviluppo e il Potenziamento delle Attività di Ricerca (SSPAR)
PNR 2001-2003 (FIRB art.8) D.M. 199 Ric. Del 8 marzo 2001

Collana:

“DIFFUSIONE E SPERIMENTAZIONE DELLA CARTOGRAFIA,
DEL TELERILEVAMENTO E DEI SISTEMI INFORMATIVI GEOGRAFICI,
COME TECNOLOGIE DIDATTICHE APPLICATE ALLO STUDIO
DEL TERRITORIO E DELL'AMBIENTE”

Volume 3. TELERILEVAMENTO

Autori: *MIRCO BOSCHETTI, LUCIO BOLZAN, MARIANO BRESCIANI, CLAUDIA GIARDINO, ALBA L'ASTORINA,*
RICCARDO LANARI, MICHELE MANUNTA, EMANUELA MAURI, EUGENIO ZILIOLI

INDICE

3.1 PRINCIPI E CONCETTI FONTAMENTALI DEL TELERILEVAMENTO.....	PAG	5
3.1.1 Il processo del telerilevamento.....»		5
3.1.2 La radiazione e lo spettro elettromagnetico.....»		6
3.1.3 Le grandezze radiometriche»		9
3.1.4 Alcune formule e leggi fisiche utili per capire il Telerilevamento»		9
3.1.5 Sorgenti naturali di energia: il Sole e la Terra»		11
3.1.6 I fenomeni di interazione elettromagnetica»		13
3.1.7 L'interazione della radiazione con le superfici naturali»		15
3.1.8 La firma spettrale delle superfici.....»		17
3.1.9 Il colore: dalla percezione soggettiva alle misure quantitative del telerilevamento.....»		20
3.2 STRUMENTI E DATI DEL TELERILEVAMENTO.....		24
3.2.1 Caratteristiche e peculiarità del telerilevamento»		24
3.2.2 La ripresa a distanza: le piattaforme.....»		26
3.2.3 I satelliti artificiali: orbite geostazionarie e polari.....»		27
3.2.4 Strumenti misura dell'energia, le bande e la visione multispettrale»		28
3.2.5 L'analisi multispettrale: caratteristiche e vantaggi»		30
3.2.6 Acquisizione immagini (macchine fotografiche e scanner)»		33
3.2.7 Sistemi attivi e passivi»		35
3.2.8 Le pellicole nella fotografia tradizionale e il sensore CCD nella fotografia digitale»		37
3.2.9 I satelliti Landsat, i loro sensori e le bande utilizzate dal sensore ETM+»		38
3.2.10 I satelliti ERS per il telerilevamento attivo.....»		40
3.2.11 Le caratteristiche delle immagini digitali»		41
3.2.12 Dalla foto al computer»		45
3.3 TECNICHE E METODI DEL TELERILEVAMENTO.....		46
3.3.1 I numeri dietro le immagini telerilevate.....»		46
3.3.2 Visualizzazione delle immagini attraverso l'uso del computer»		46
3.3.3 Il meccanismo della sintesi additiva»		47
3.3.4 Oltre il visibile : leggiamo le immagini.....»		48
3.3.5 Analisi delle immagini telerilevate»		50
3.3.6 Tecniche di miglioramento delle immagini»		51
3.3.7 Operazioni sulle immagini e indici di vegetazione»		52
3.3.8 Dal campo al mondo.....»		53
3.3.9 Dalle immagini alle mappe»		54
3.3.10 L'interpretazione visiva»		55
3.3.11 Classificazioni automatiche.»		57
3.3.12 Il confronto multitemporale.....»		59
3.3.13 Analizzare il cambiamento.....»		60

3.4	APPLICAZIONI: IL TELERILEVAMENTO DELL'ACQUA	PAG 62
3.4.1	Perché è importante studiare l'acqua..... »	62
3.4.2	Il Telerilevamento per lo studio delle acque superficiali. »	62
3.4.3	Determinazione della clorofilla-a. »	64
3.4.4	La temperatura »	65
3.4.5	Le nuvole e il vapore acqueo »	65
3.5	APPLICAZIONI: IL TELERILEVAMENTO PER IL SUOLO.....	66
3.5.1	La tecnica SBAS per lo studio delle deformazioni del suolo, di edifici e di singole strutture dell'area di Napoli »	67
3.5.2	Il monitoraggio del Vesuvio attraverso il Telerilevamento attivo »	68
3.6	APPLICAZIONI: IL TELERILEVAMENTO PER LO STUDIO DEI GHIACCIAI.....	69
3.6.1	Il monitoraggio dei ghiacciai »	70
3.6.2	La firma spettrale di neve e ghiaccio »	70
3.6.3	Proprietà ottiche e comportamento spettrale di neve e ghiaccio..... »	70
3.6.4	Lo studio dei ghiacciai condotto dall'IREA..... »	71
3.6.5	Sensori usati per l'osservazione dei ghiacciai alpini »	71
3.7	APPLICAZIONI: IL TELERILEVAMENTO DELLA VEGETAZIONE.....	73
3.7.1	Principi di telerilevamento della vegetazione »	73
3.7.2	Perché studiare l'agricoltura?..... »	74
3.7.3	Caso di studio: monitoraggio delle risaie..... »	74

3.1 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,

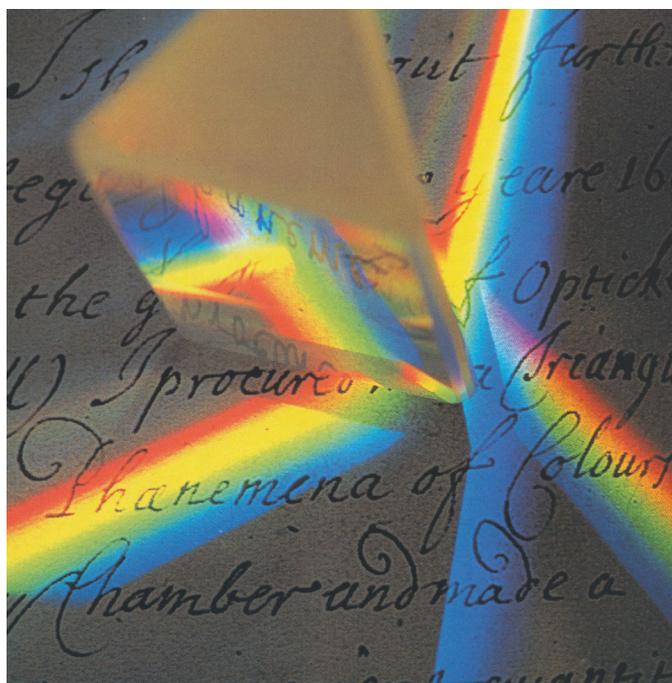


Figura 3.1.1 Il telerilevamento misura l'energia emessa o riflessa dalle superfici nelle varie porzioni dello spettro elettromagnetico. Fondamentali per lo sviluppo di questa disciplina sono stati gli studi sulla fisica delle onde elettromagnetiche; tra questi, gli esperimenti di Newton del 1666 che, grazie all'uso di un prisma, scompose la luce bianca in uno spettro di luce colorata.

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).

3.1.1 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 ottenere 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 porzione 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 rag-

giungere 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)

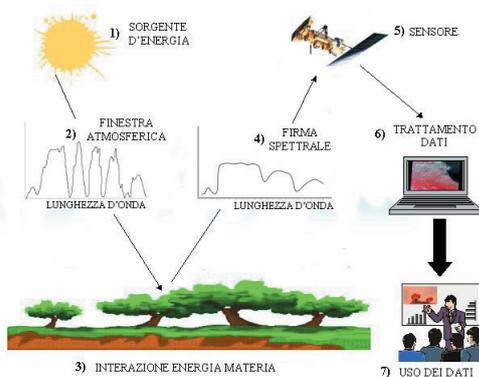


Figura 3.1.2

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.

3.1.2 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 (fig. 3.1.3) Entrambi questi campi viaggiano alla velocità della luce c .

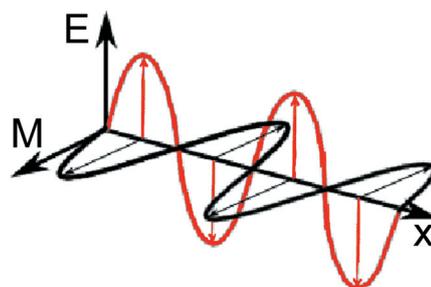


Figura 3.1.3 I campi E e M sono ortogonali tra loro rispetto alla direzione di propagazione.

Le caratteristiche dell'**onda** interessanti ai fini del Telerilevamento sono due: la lunghezza e la frequenza [fig. 3.1.4].

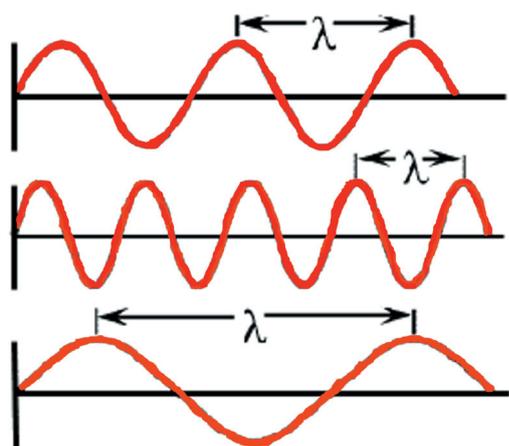


Figura 3.1.4 L'energia elettromagnetica (EM) si propaga nello spazio mediante onde di lunghezza variabile

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:

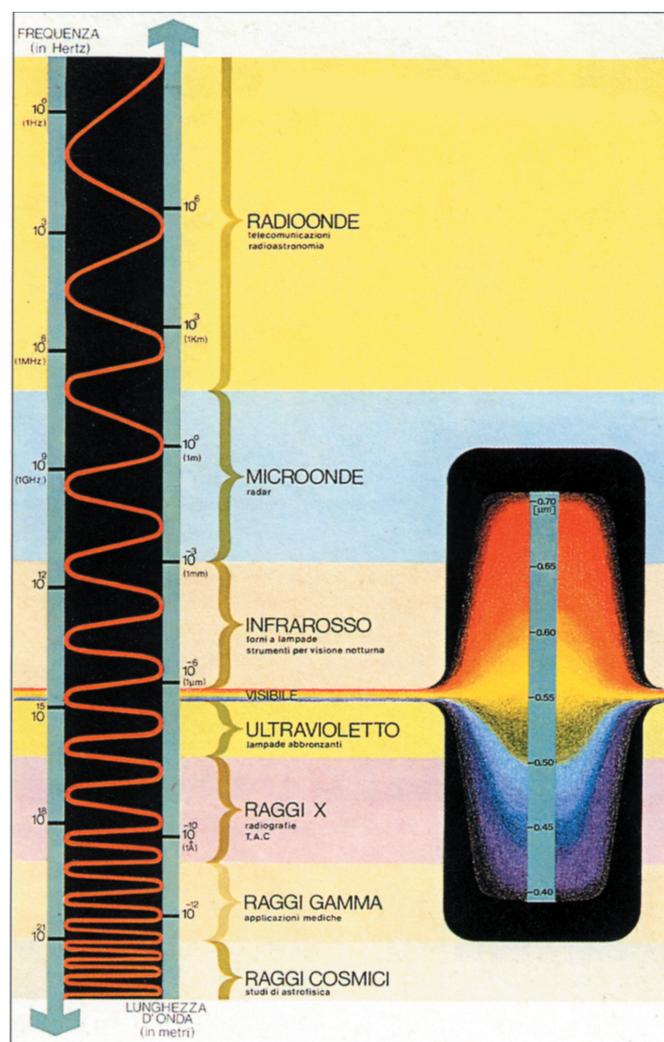
$$c = \lambda \nu \text{ [m s}^{-1}\text{]}$$

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 dipendo-

no 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 mm–300 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.



LO SPETTRO ELETTROMAGNETICO

Figura 3.1.5 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 μm) 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, vedi figura 3.1.6) o rilevate grazie ad appositi sensori impiegati nel Telerilevamento.
- L'*infrarosso*, o *IR*, (0,7 μm –1 mm) che ospita radiazioni con onde più lunghe rispetto a quelle del



Figura 3.1.6 La visione negli animali è molto diversa da quella dell'uomo. Si passa dal mondo in bianco e nero dei cani e dei gatti a quello UV delle api, sino ad i sensori termici del serpente a sonagli. Rispetto al mondo sensoriale degli animali, il potere visivo dell'uomo è davvero poca cosa!

visibile, è molto ampia e viene ulteriormente suddivisa, in merito a considerazioni di tipo fisico in quattro regioni (vedi tabella 3.1.1).

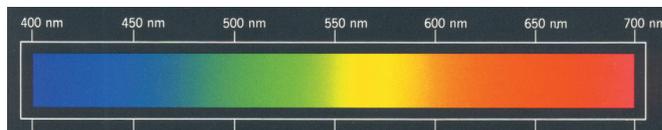


Figura 3.1.7 I colori sono la manifestazione dell'energia visibile, compresa in un intervallo di lunghezze d'onda tra circa 0,4 e 0,7 nm. Ad ogni colore corrisponde una radiazione con energia diversa, caratterizzata da una propria lunghezza d'onda.

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

Tabella 3.1.1

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 fig. 3.1.8).

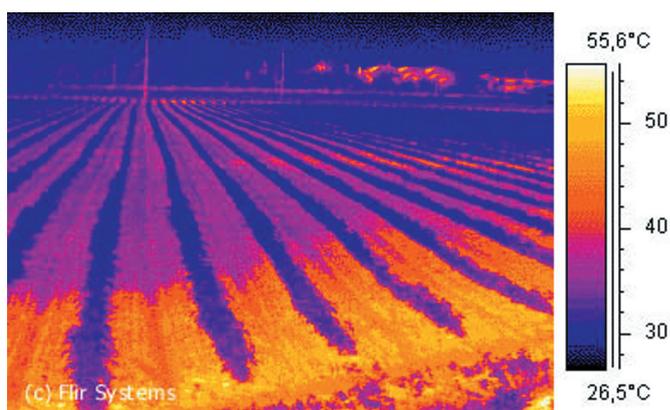


Figura 3.1.8 Un esempio di applicazione dell'IR Termico per lo studio di fenomeni ambientali è rappresentato dalla valutazione della corretta irrigazione di vasti campi agricoli per stabilire l'efficacia degli impianti di irrigazione. Nella foto una termografia di un campo agricolo in cui il colore indica 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.

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

3.1.4 Alcune formule e leggi fisiche utili per capire il Telerilevamento

Introduciamo, a questo punto, alcune leggi fisiche utili per comprendere meglio i meccanismi alla base delle tecniche di Telerilevamento e che permettono di discriminare il comportamento delle varie superfici. La descrizione di queste leggi ci permetterà anche di capire la dinamica di alcuni fenomeni naturali cui assistiamo tutti i giorni.

<ul style="list-style-type: none"> • Potenza (<i>Flusso radiante</i>) $\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad [\text{W}]$ <p>Dove Q equivale alla quantità di energia e t all'unità di tempo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Irradianza (<i>Densità di flusso radiante incidente</i>) $E = \frac{d\Phi}{dA} \quad [\text{W m}^{-2}]$ <p>Dove A equivale all'area su cui incide il flusso e F è il flusso radiante</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exitanza (<i>Densità di flusso radiante in uscita</i>) $M = \frac{d\Phi}{dA} \quad [\text{W m}^{-2}]$ <p>Dove A è l'area da cui proviene l'energia</p> <ul style="list-style-type: none"> • Radianza $L = d\left(\frac{d\Phi}{dA \cos\theta}\right) \cdot \frac{1}{d\omega} = \frac{d^2\Phi}{dA \cos\theta d\omega} \quad [\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}]$ <p>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.</p>	
---	--

Il corpo nero. Il primo concetto da introdurre è quello di **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.

Legge di Planck. Questa legge esprime come un corpo nero, con temperatura T superiore allo zero assoluto, emette energia sotto forma di radiazioni. Essa descrive inoltre come tale flusso radiante aumenta in funzione della temperatura e come varia alle diverse lunghezze d'onda.

La densità di flusso radiante emessa $M_{(\lambda,T)}$ alla lunghezza d'onda λ dalla superficie di un corpo nero che si trovi alla temperatura assoluta T è definita

$$M_{(\lambda,T)} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad [\text{W cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}] \quad (1)$$

perciò dalla legge di Planck, come segue:

dove C_1 e C_2 sono delle costanti [$C_1 = 37.413 \text{ W cm}^{-2} \mu\text{m}^{-2}$, $C_2 = 14.388 \mu\text{m K}$].

Le sorgenti di energia possono essere considerate, in prima approssimazione, come dei corpi neri. A titolo di esempio, si mostrano in figura le curve di emissione derivate dalla legge di Planck per alcuni corpi neri, fra cui quelli che approssimano il comportamento del Sole con $T = 6000 \text{ K}$, di una lampada ad incandescenza con $T = 3000 \text{ K}$ e della Terra con $T = 300 \text{ K}$. Si ricorda che 273°K corrispondono a 1°C .

$$M_{(T)} = \int_0^\infty M_{(\lambda,T)} d\lambda = \sigma T^4 \quad [\text{W cm}^{-2}] \quad (2)$$

Legge di Stefan-Boltzmann. La quantità di energia $M(\lambda T)$ emessa da un corpo nero, ad una data temperatura T e su tutte le lunghezze d'onda, si ottiene integrando la funzione $M(\lambda, T)$ su tutto lo spettro: dove σ è la costante di Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67$

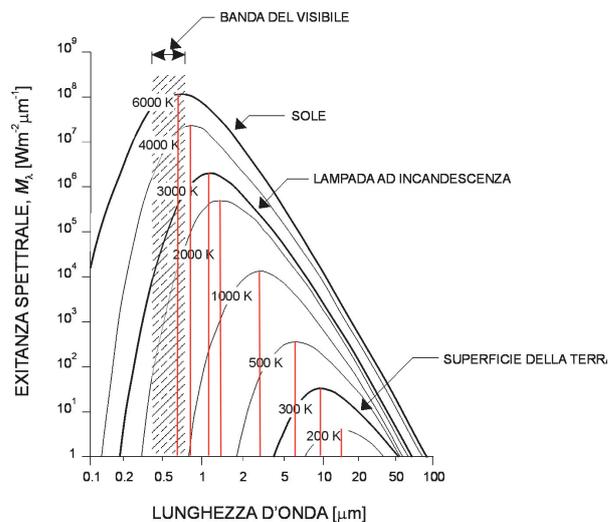


Figura 3.1.9 Densità di flusso radiante emessa $M(\lambda)$ da superfici di corpo nero poste a diverse temperature; alla temperatura di 6000 K il Sole emette molta più energia in tutte le lunghezze d'onda (exitanza spettrale) rispetto sia ad una lampadina ad incandescenza, a 3000 K, sia alla superficie terrestre, che ha una temperatura media di 300 K. Dalle curve di Planck si nota inoltre che con il diminuire della T i massimi di emissione si spostano a lunghezze d'onda sempre più lunghe, e che l'area sottesa ad ogni curva diminuisce rapidamente.

$\times 10^{-4} \text{ W cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$].

La relazione qui sopra è nota come legge di Stefan-Boltzmann ed indica come la quantità totale di energia $M(T)$ emessa complessivamente da un corpo nero, sia proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura T e quindi aumenta molto rapidamente al crescere della stessa, come mostrato dai grafici della legge di Planck. Essa infatti corrisponde all'area compresa tra una curva di Planck e l'asse delle lunghezze d'onda, che è assai più grande per il corpo nero che approssima il Sole rispetto a quello che approssima la Terra

Legge di Wien. Dall'analisi delle curve illustrate si può osservare che la lunghezza d'onda corrispondente alla massima emissione λ_{max} non è sempre la stessa ma dipende dalla temperatura T . Risolvendo matematicamente l'equazione n. 2, il punto massimo di emissione per una certa temperatura T può essere determinato con la seguente formula [3]:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2898}{T} \quad [\mu\text{m}] \quad (3)$$

La relazione, nota come legge di Wien, mostra come la lunghezza d'onda λ_{max} si sposti verso valori più piccoli man mano che cresce la temperatura T della superficie. I valori di picco di emissione per le tre sorgenti nell'esempio sopra illustrato risultano quindi essere: $9,66 \mu\text{m}$ per la superficie della Terra (nell'infrarosso termico), $0,966 \mu\text{m}$ per la lampada a incandescenza (nell'infrarosso vicino) e $0,483 \mu\text{m}$ per il Sole (nel blu-verde, e quindi nel visibile).



Figura 3.1.10 I colori visibili in una colata di fusione sono un chiaro esempio di come, secondo la legge di Wien, al variare della temperatura vari il colore di emissione: dal giallo intenso che caratterizza il centro più caldo della colata si passa verso gli arancioni e i rossi delle zone più “fredde” esterne)

Legge di Kirchoff. Un'altra relazione molto importante in Telerilevamento è quella che rapporta l'energia assorbita da un corpo rispetto a quella emessa. La capacità di un corpo di emettere energia a una data temperatura è definita emissività e viene indicata con il parametro ε che ha valori tra 0 e 1. La proprietà di assorbire l'energia incidente, invece, è definita dal coefficiente di assorbimento ed è espressa dal parametro α . Per la legge di Kirchoff l'emissività di qualsiasi corpo è pari al suo coefficiente di assorbimento ovvero

$$\varepsilon = \alpha \quad (4)$$

In generale, un corpo con grandi capacità di assorbire energia, detto “assorbitore”, mostra una buona capacità di riemetterla e viceversa. Se un

corpo assorbe tutta l'energia incidente avrà un valore di α uguale ad 1; conseguentemente la sua ε avrà anch'essa valore unitario, in altre parole, tale corpo emetterà tutta l'energia assorbita. Queste che abbiamo descritto sono le caratteristiche proprie di un corpo nero, di cui si è già parlato, ovvero di un corpo che mostra massima capacità di assorbimento ed emissione per tutte le lunghezze d'onda.

Tutti gli altri corpi avranno invece un valore di ε ed α minori di 1 in quanto ε può essere definito come il rapporto fra il flusso di energia radiante Φ_e emessa da una superficie reale posta ad una certa temperatura T e quello Φ_{cn} emesso da una superficie di corpo nero posta alla stessa temperatura. Dunque,

$$\varepsilon = \frac{\Phi_e}{\Phi_{cn}} \quad (5)$$

Le leggi per i corpi reali. In certe condizioni ed a determinate lunghezze d'onda, anche l'acqua del mare ed un tranquillo laghetto di montagna si comportano come corpi neri: di giorno assorbono energia solare mentre di notte la riemettono sotto forma di calore. Considerato quanto appena descritto, le leggi di Planck e di Stefan-Boltzman, nel caso di superfici reali, andranno riscritte rispettivamente come:

$$M_{reale(\lambda,T)} = \varepsilon M_{cn(\lambda,T)} \quad [\text{W cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}] \quad (6)$$

$$M_{reale(T)} = \varepsilon M_{cn(T)} = \varepsilon \sigma T^4 \quad [\text{W cm}^{-2}] \quad (7)$$

3.1.5 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 di-

verso 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. 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. Per la legge di Wien, Sole e Terra hanno due massimi di emissione molto diversi, rispettivamente di $9,66 \mu\text{m}$ e di $0,483 \mu\text{m}$

Nonostante i massimi di emissione delle due sorgenti siano molti diversi, bisogna ricordare che, secondo la legge di Planck, il Sole emette lungo tutto lo spettro.

Esiste perciò una banda – fra i 3 ed i $7 \mu\text{m}$ di lun-

ghezza 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!

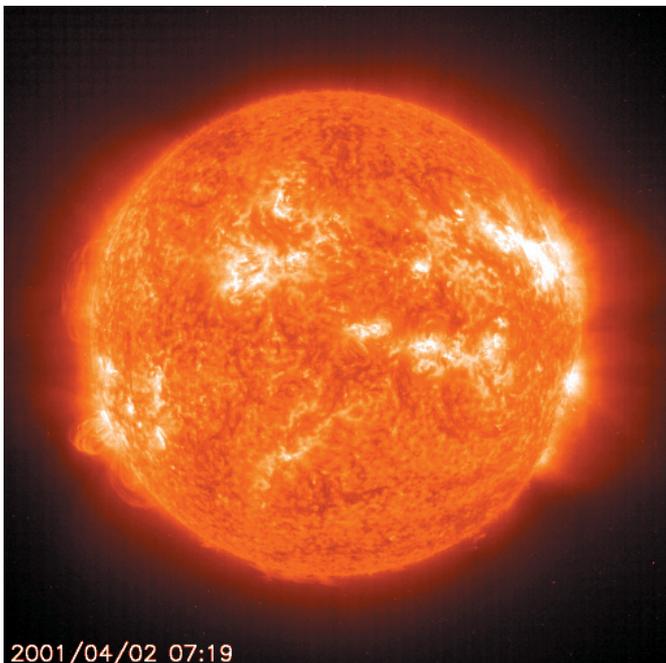


Figura 3.1.11 Il Sole, ad una temperatura media attorno ai 6000 K , irraggia essenzialmente attorno alle lunghezze d'onda nel visibile ($0,4-0,7 \mu\text{m}$) e, come visto dalla legge di Wien, si comporta come un corpo nero, in quanto emette in tutte le lunghezze d'onda.



Figura 3.1.12 - La Terra, o meglio l'intero ambiente terrestre, essendo posto ad una temperatura media di $280-300 \text{ K}$, irraggia soprattutto nella banda dell'infrarosso termico ($8-14 \mu\text{m}$).

3.1.6 I fenomeni di interazione elettromagnetica

Quando si passa dai modelli fisici descritti dalle equazioni del paragrafo precedente 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, e il **comportamento delle superfici naturali** che, come vedremo più avanti, possono riflettere, assorbire o trasmettere la radiazione.

Influenza dell'atmosfera.

L'atmosfera è di particolare interesse in Telerilevamento, in quanto è il mezzo attraverso cui l'energia elettromagnetica viaggia nel suo percorso dalla sorgente al bersaglio e quindi al sensore. Lo studio della sua composizione e della sua interazione con la radiazione elettromagnetica è dunque di fondamentale importanza, perché da esso dipende una corretta interpretazione del dato. 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,

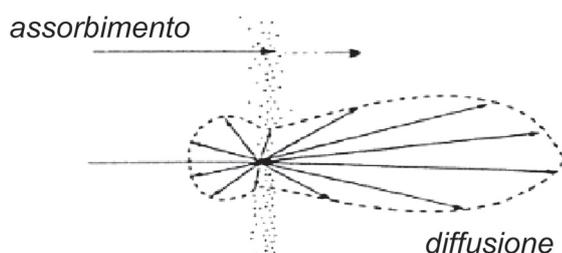


Figura 3.1.13 I principali fenomeni di interazione della radiazione solare con l'atmosfera: assorbimento e diffusione

mettendo in campo due comportamenti principali: l'*assorbimento* che riduce la quantità di energia incidente e la *diffusione* (*scattering*) che, al contrario, ridistribuisce la radiazione in arrivo cambiandone 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 μm), dell'infrarosso vicino (0,7–1,3 μm ; 1,5–1,8 μm ; 2–2,6 μm), dell'infrarosso medio (3–5 μm), dell'infrarosso termico (8–14 μm) e, infine, quella 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.

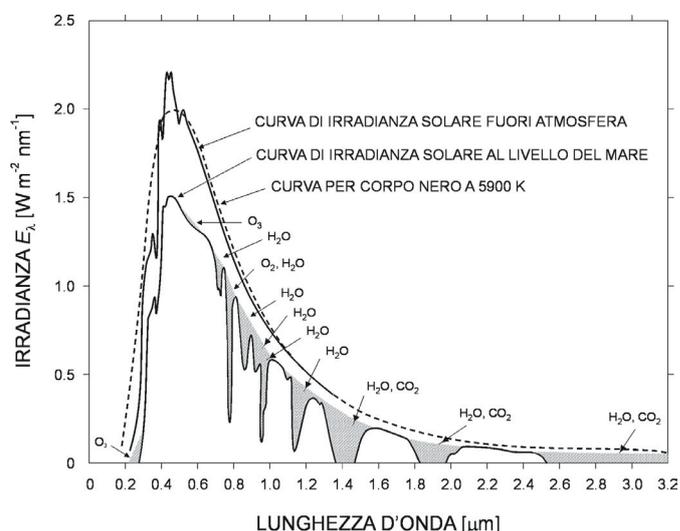


Figura 3.1.14 Gli assorbimenti selettivi delle molecole dei vari gas e composti presenti nell'atmosfera definiscono delle "finestre" ottimali per la trasmissione dell'energia elettromagnetica.

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 è 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.

La diffusione di Rayleigh

Il fenomeno di diffusione più comune è quello cosiddetto di Rayleigh (in riferimento alla omonima legge fisica) che si verifica quando le particelle sono più piccole della lunghezza d'onda della radiazione. Più corta è la lunghezza d'onda, maggiore sarà la quantità di radiazione diffusa.

Questo fenomeno determina effetti diversi ed è responsabile delle svariate colorazioni che può assumere il cielo nelle varie giornate o in diversi momenti della stessa giornata.



Figura 3.1.15 Il tramonto ha una tipica colorazione dovuta alla diffusione delle lunghezze d'onda maggiori che percorrono una grande distanza dalla fonte di energia.

Il colore azzurro del cielo di mattina, ad esempio è dovuto al fatto che l'energia solare a lunghezze d'onda corta (vicine al blu) viene diffusa in maniera maggiore rispetto a quelle d'onda lunga, come ad esempio il rosso, come previsto dalla legge di Rayleigh.

Lo stesso fenomeno spiega il colore rosso del cielo all'alba e viola al tramonto (fig. 3.1.15); in tali situazioni i raggi del Sole raggiungono la superficie terrestre dopo aver attraversato uno spessore d'atmosfera molto grande. Pertanto l'energia che raggiunge l'osservatore è solo quella nelle sue componenti a lunghezza d'onda maggiore che subiscono meno il fenomeno della diffusione.

La diffusione di Mie

La diffusione di Mie si ha invece quando la lunghezza d'onda della radiazione incidente è delle stesse dimensioni delle particelle incontrate. Essa tende a influenzare le lunghezze d'onda più lunghe nel visibile, dal giallo al rosso, e in situazioni del tutto particolari.

Esempi di questo meccanismo sono i fumi e le polveri nella bassa atmosfera che provocano foschia, di solito giallastra, come succede spesso nei cieli delle aree fortemente industrializzate e popolate (fig. 3.1.16a).



Figura 3.1.16 I fumi che fuoriescono da una ciminiera industriale (a) e le nuvole (b) sono due esempi dei complessi fenomeni di diffusione che avvengono nell'atmosfera

La diffusione non-selettiva

La diffusione non-selettiva è così chiamata perché influenza quasi allo stesso modo tutto il visibile, l'infrarosso vicino e l'infrarosso medio. Essa si verifica quando le particelle dell'atmosfera, in particolare le goccioline d'acqua e le polveri, dell'ordine del micron e oltre, sono molto più grandi delle lunghezze d'onda della radiazione con cui interagiscono.

Il fenomeno è responsabile dell'aspetto bianco lattiginoso in cui appare il cielo in presenza di nebbia e nuvole (fig. 3.1.16b).

Se non vi fosse il fenomeno della diffusione, il cielo apparirebbe nero come effettivamente è nello spazio extra-atmosferico, dove il vuoto, cioè l'assenza di particelle, impedisce qualunque tipo di interazione.



3.1.7 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: una parte del flusso radiante incidente Φ_i viene **riflessa** Φ_r , una parte viene **assorbita** Φ_a , 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:

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

Solo un corpo nero, o radiatore integrale, presenta una condizione ideale dove tutta la radiazione incidente Φ_i viene assorbita e poi trasformata in energia emessa Φ_e , per questo corpo τ e ρ saranno uguali a zero ovvero l'energia non verrà trasmessa né riflessa in ogni lunghezza d'onda.

Nel caso di corpi opachi, e cioè per la gran parte delle superfici naturali, τ risulta generalmente trascurabile. Se poniamo ad esempio un oggetto davanti al Sole, questo ci schermanà dalla luce proiettando un'ombra nella regione di influenza, e quindi la relazione precedente si semplifica nella seguente:

$$a + \rho = 1$$

Dalla legge di Kirchhoff si è visto come l'energia assorbita viene poi riemessa per cui, sostituendo α con il valore dell'emissività ε , si ha anche che:

$$\varepsilon + \rho = 1$$

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.

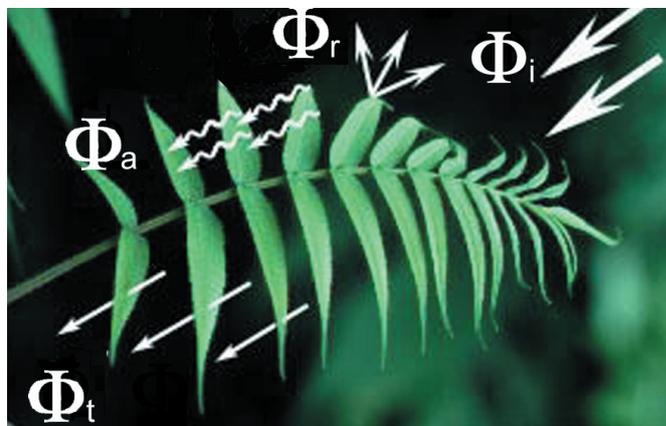


Figura 3.1.17 Interazioni EEM sulle superfici naturali

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.

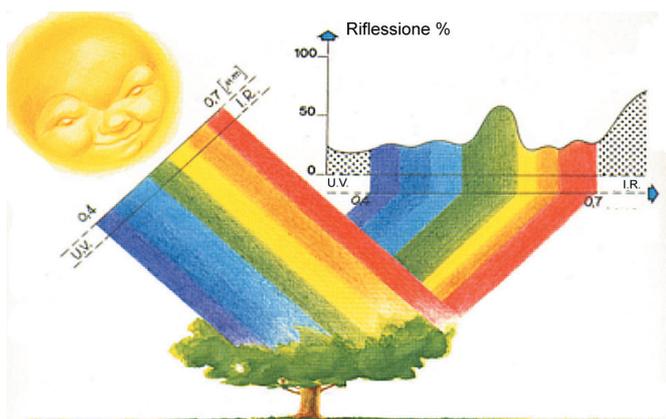


Figura 3.1.18 Il colore verde delle foglie dipende dalla maggiore riflettività nel verde rispetto alle altre lunghezze d'onda del visibile.

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 fig. 19). 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.

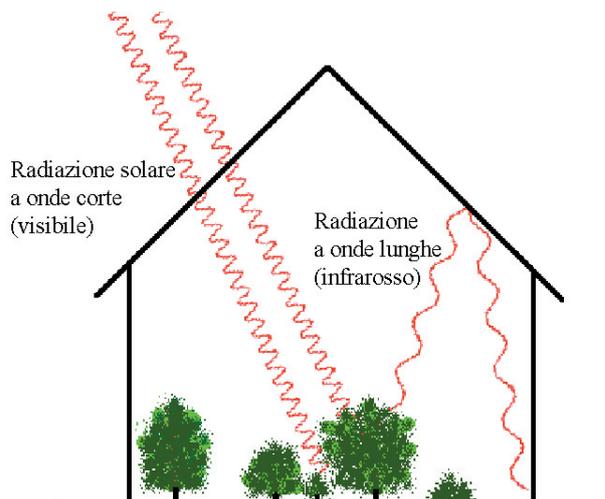


Figura 3.1.19 L'effetto serra non è altro che un processo naturale dovuto al diverso comportamenti di alcuni gas atmosferici nei confronti della radiazione: trasparenti ad onde corte e schermanti a onde lunghe

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 (vedi fig. 20).

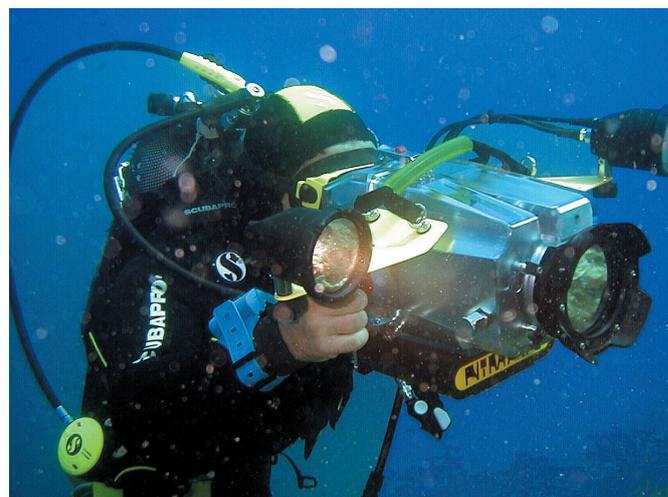


Figura 3.1.20 Una foto scattata da un sub mostrerà ambienti con colori blu scuri, perché solo queste lunghezze d'onda raggiungono la profondità del mare.

L'emissione

In Telerilevamento si fissa attorno a $3 \mu\text{m}$ il limite superiore della porzione di energia solare riflessa dalla superficie terrestre rilevabile, che è anche il limite tra l'infrarosso medio e vicino, come visto in precedenza. Oltre questa soglia e fino a $14 \mu\text{m}$ l'energia rilevabile è prodotta essenzialmente dal fenomeno dell'emissione. *In particolare, nella regione tra 8 e $14 \mu\text{m}$, 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.

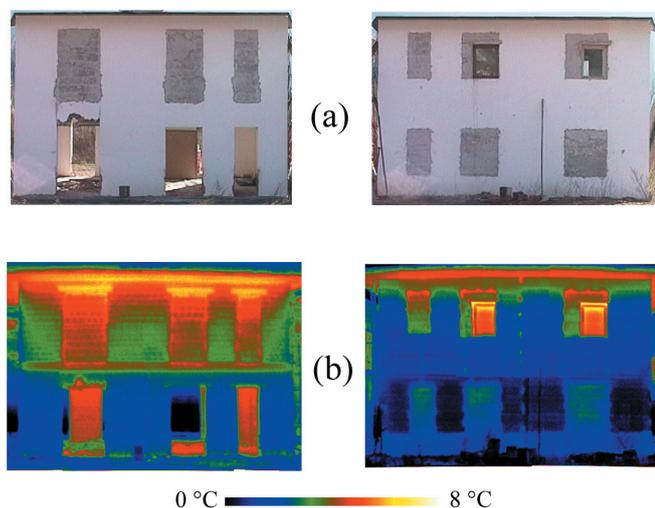


Figura 3.1.21 Le due immagini (a) riprendono due abitazioni simili; le immagini sottostanti (b) sono ottenute attraverso termografia ed evidenziano le differenze delle due abitazioni dal punto di vista termico; nella casa di sinistra la temperatura è superiore per la mancanza del rivestimento isolante; in quella di destra la presenza del rivestimento determina temperature inferiori

3.1.8 La firma spettrale delle superfici

Gli accenni alla fisica delle onde elettromagnetiche dei paragrafi precedenti 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.

Ovviamente la firma spettrale interessa anche regioni poste oltre il visibile, come l'infrarosso. Prendiamo ad esempio l'andamento di risposta spettrale della vegetazione: se i nostri occhi fossero in grado di "vedere" l'energia infrarossa, gli alberi e le loro foglie ci apparirebbero di un colore "infrarosso" piuttosto che verde, essendo il valore di ρ nell'infrarosso molto maggiore che nelle altre lunghezze d'onda, incluso il verde, come si può vedere in figura 3.1.22.

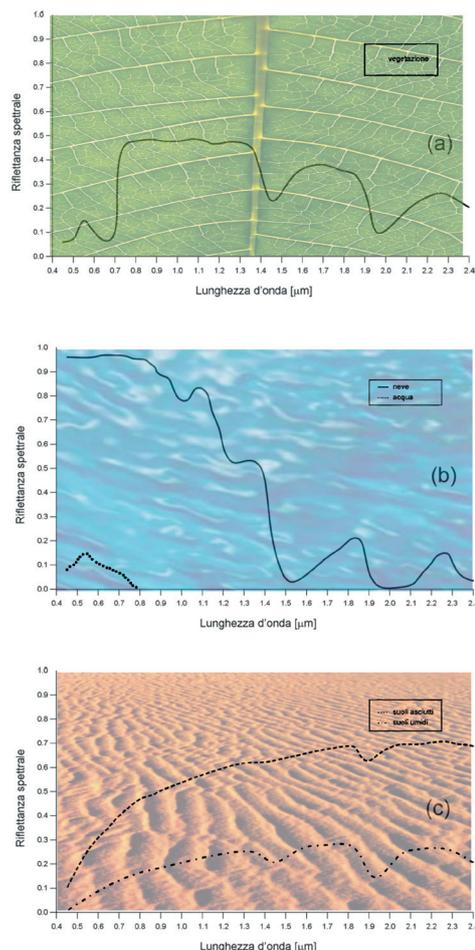


Figura 3.1.22 Le "firme spettrali" di riflessione delle categorie più significative del paesaggio: la vegetazione (a), l'acqua (b), i suoli nudi.

Alcuni esempi di firme spettrali: vegetazione, acqua e suolo.

Come più volte ripetuto, tutte le superfici naturali hanno comportamenti variabili nei confronti della radiazione incidente a seconda del loro stato e delle loro caratteristiche. Questo principio è alla base delle tecniche e dei metodi sviluppati dal Telerilevamento per il loro riconoscimento.

Esaminando il comportamento spettrale "standard" di alcune superfici, che si ottengono da misurazioni spettrali, qui di seguito riportati nella figura 3.1.22, si può distinguere, ad esempio, la neve dal ghiaccio, o l'acqua dalla vegetazione. Discutiamo ora il comportamento delle superfici naturali illustrato nei grafici

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, più contrastato in alcune bande di assorbi-

mento, tipicamente le stesse di assorbimento del vapore acqueo nell'atmosfera.

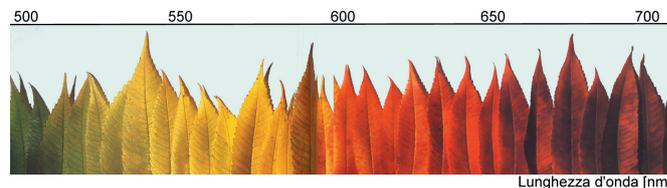


Figura 3.1.23 Il colore delle foglie di alcuni alberi descrive perfettamente lo spettro di riflessione dal verde al rosso, in relazione alla concentrazione della clorofilla presente e quindi all'efficienza del processo di sintesi.

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.

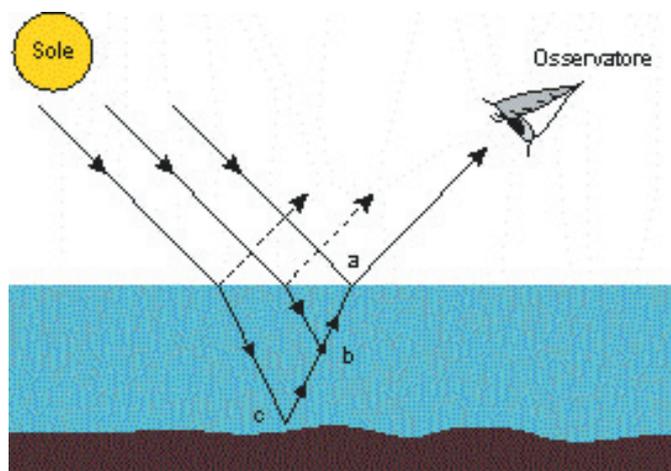
Ciò in base al suo particolare comportamento spettrale che generalmente contrasta con gli altri elementi del paesaggio al contorno. Ed anche perché questo elemento, insieme all'atmosfera, non è propriamente un corpo opaco, almeno per le bande del visibile; al contrario il coefficiente di trasmittività 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 trasmittività a 450 nm, nel blu. Usualmente l'acqua in

condizioni di purezza, riflette fino ad un massimo che può raggiungere il 5% dell'energia incidente, valore che, rispetto alle normali superfici opache, risulta estremamente piccolo. Se invece si potesse osservare uno specchio d'acqua colpito solo da radiazione incidente rossa o infrarossa, esso apparirebbe scuro, in quanto tali lunghezze d'onda vengono totalmente assorbite. Quando nell'acqua è presente sedimento sospeso, come ad esempio, nei fiumi in piena, la diffusione aumenta anche per lunghezze d'onda maggiori inducendo una colorazione giallo-rossastra; in presenza di forti concentrazioni saline per lo stesso motivo, la colorazione tende al rosa. Infine, nel caso di corpi d'acqua poco profondi il colore dell'acqua è determinato anche dal contributo di riflessione del fondale.



Figura 3.1.24 Il colore dell'acqua dipende dalla sua composizione e dalla combinazione di trasmissione e riflessione rispetto a diverse componenti: il fondo, il corpo idrico (a), la superficie (b)



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.



Figura 3.1.25 Il colore del suolo dipende da vari fattori quali la composizione chimica e fisica, il tasso di umidità, la tessitura e la struttura.

3.1.9 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.

Percezione soggettiva del colore. Se una sera, trovandoci in compagnia davanti ad uno spettacolare tramonto sul mare, provassimo a definire il colore del cielo che stiamo ammirando, forse ci sorprenderemmo a scoprire la variabilità delle risposte: per noi è di un rosso intenso, mentre il nostro accompagnatore giurerebbe di vederlo viola. Linguaggi diversi, diottrie differenti o discordanza di sentimenti? Forse tutte queste risposte insieme.

Il fatto è che, quando proviamo a definire un colore, in effetti non stiamo riportando la nostra sensazione bensì l'interpretazione soggettiva di una percezione.

Per capire il perché, forse può essere utile spiegare la differenza tra *sensazione* e *percezione*.

La **sensazione** è un processo mediante il quale il nostro organismo riceve energia fisica dall'ambiente esterno (calore, freddo, ecc.). Si tratta di un processo passivo che avviene nell'organo di senso (nel caso della luce, l'occhio) e non presuppone necessariamente il coinvolgimento consapevole del soggetto.

La **percezione** è invece il processo con cui organizziamo e interpretiamo la sensazione; è un processo attivo che avviene nel cervello coinvolgendo anche l'esperienza, l'emotività e lo stato d'animo del momento.

Tornando al nostro tramonto al mare, dunque, la

risposta non poteva essere che varia, perché la percezione visiva avviene grazie al **sistema cervello-occhio**, un sistema comune a tutti gli esseri umani, ma condizionato da limiti di natura fisiologica e psicologica (vedi box su sistema occhio-cervello).



Figura 3.1.26 A volte anche il colore di un tramonto al mare è una questione di opinione

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, adattando-

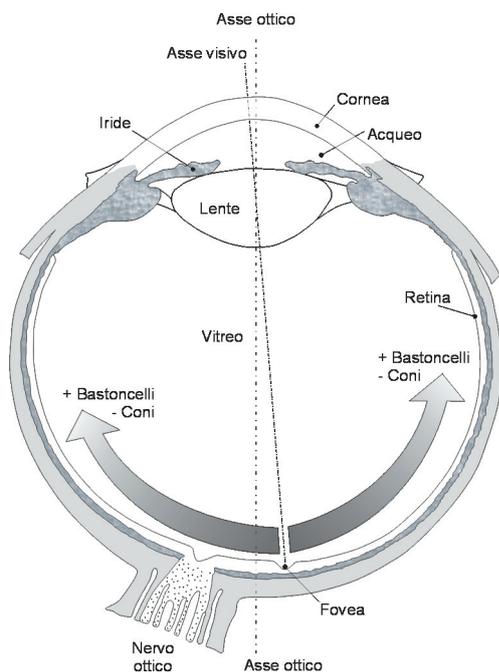


Figura 3.1.27 Schema dell'occhio umano. Sono messe in evidenza le componenti principali, quali la parte ottica (cristallino, iride, asse ottico), sensoriale (retina e fovea) e di trasmissione (nervi ottici). Si noti anche la diversa densità di distribuzione dei fotorecettori (coni e bastoncelli) rispetto alla posizione della fovea.

si meglio alla luce e percependo meglio i colori. I coni ricettori, tipicamente attivi durante il giorno e responsabili della visione cromatica, sono distinti in tre famiglie specializzate a percepire radianze spettralmente diverse, con picchi di sensibilità rispettivamente a:

440 nm per le **piccole-medie lunghezze** d'onda (blu),
 540 nm per le **medie** (verde) e
 580 nm (giallo-rosso) per quelle **medio-lunghe**.

I **bastoncelli** sono prevalentemente alla periferia e permettono la visione notturna, essendo molto più sensibili alla luce rispetto ai coni. La parte centrale della retina (detta macula) è responsabile della visione centrale, permette cioè di distinguere i dettagli delle immagini. Al suo centro c'è la fovea responsabile della percezione dei dettagli più piccoli, in quanto caratterizzata da un'altissima concentrazione di coni.

Il segnale luminoso colpisce i fotorecettori e, attra-

verso una trasmissione complessa degli stimoli, passa al nervo ottico. I due nervi ottici, provenienti rispettivamente dall'occhio destro e sinistro, si incontrano poi nel chiasma ottico dove ognuno di essi si divide in due parti, separando le rispettive informazioni della metà destra e della metà sinistra del campo visivo. Le due metà dei nervi ottici contenenti le informazioni della parte destra si uniscono e procedono per trasmettere le informazioni alla parte sinistra della corteccia cerebrale deputata alla visione. L'intero processo, in forma simmetrica, si ripete per la parte sinistra del campo di vista che sarà quindi trasmessa alla parte destra della corteccia cerebrale. Le informazioni luminose così veicolate sotto forma di impulsi nervosi al cervello vengono finalmente lette ed interpretate in termini di posizione nello spazio, tinta, intensità e saturazione cromatica.

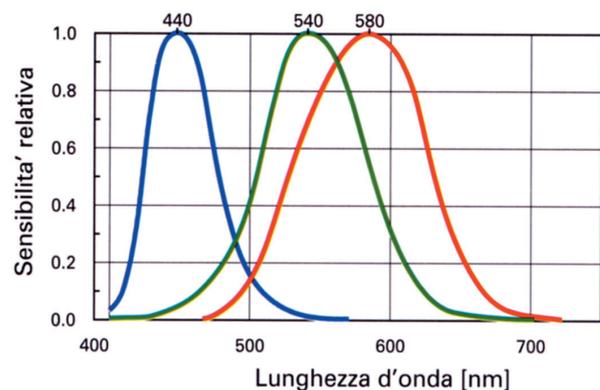


Figura 3.1.28 Confronto delle diverse sensibilità dei fotorecettori dell'occhio umano nei tre colori fondamentali blu, verde e rosso (a).

Rappresentazione oggettiva del colore. Studiando il funzionamento del sistema cervello-occhio abbiamo compreso i meccanismi funzionali della visione e i limiti di natura psico-fisiologica insiti nella percezione visiva.

Ma spesso ci troviamo di fronte alla necessità di descrivere **oggettivamente**, cioè in modo univoco e quantitativo, ciò che avvertiamo come percezioni cromatiche. Quando andiamo, ad esempio, a comprare una vernice per tinteggiare le pareti di casa, o a scegliere il colore per il tessuto del nuovo divano. Per risolvere questo problema, noi oggi ricorriamo a "campionari dei colori" che sono stati definiti nel corso degli anni sulla base di caratteristiche oggettive.

Sintesi additiva e sintesi sottrattiva. Studi sperimentali sulla fisiologia dell'occhio umano hanno mostrato come, a partire dalla sensibilità dell'occhio alle diverse radiazioni dello spettro elettromagnetico, sia possibile riprodurre tutti i colori percepibili combinando tra loro tre colori primari: il blu, il verde e il rosso. Il processo di tale combinazione è stato chiamato *sintesi additiva*.

Provando a proiettare questi colori primari a coppie su di uno schermo bianco, si nota che essi producono, rispettivamente, altri tre colori: ciano, magenta e giallo, definiti *colori complementari*. Ma questi colori si possono ottenere anche per sottrazione di un colore primario dalla luce bianca (*sintesi sottrattiva*).

Il meccanismo di combinazione dei colori è stato espresso scientificamente nella *teoria di Young-Helmoltz*, detta anche delle componenti o di tricromaticità. Esso è alla base della rappresentazione dei colori in molti ambiti quotidiani: da quando ritocchiamo le nostre immagini sul monitor di un computer, a quando vediamo un film in televisione, o guardiamo le foto delle vacanze stampate a colori.

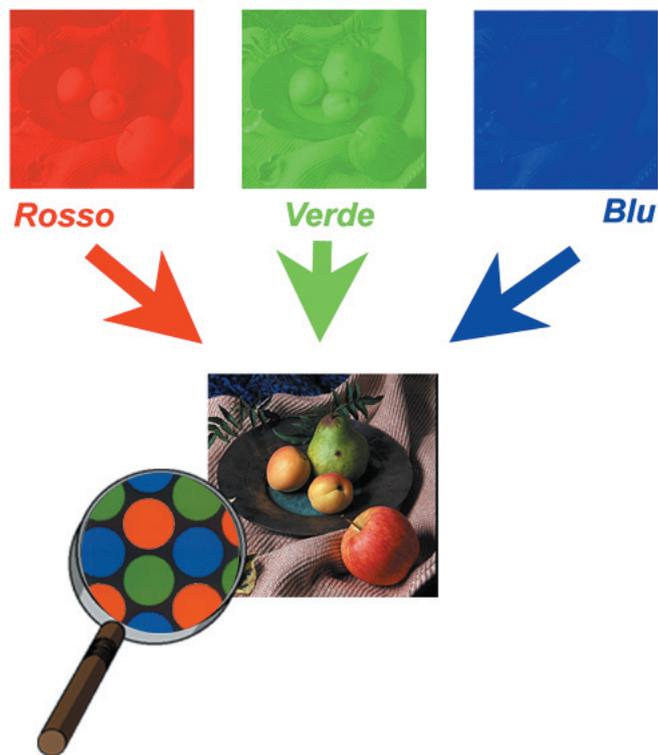


Figura 3.1.30 Il modo più semplice per sperimentare la sintesi additiva consiste nell'avvicinare l'occhio allo schermo di una TV a colori sino a distinguere gli elementi emittenti dello schermo; si potrà notare così come attraverso diverse combinazioni di rosso, verde e blu si ottengano, alla dovuta distanza, gli altri colori visualizzabili. Il sistema di composizione è chiamato RGB dalle iniziali in inglese dei tre colori (Red, Green, Blue).

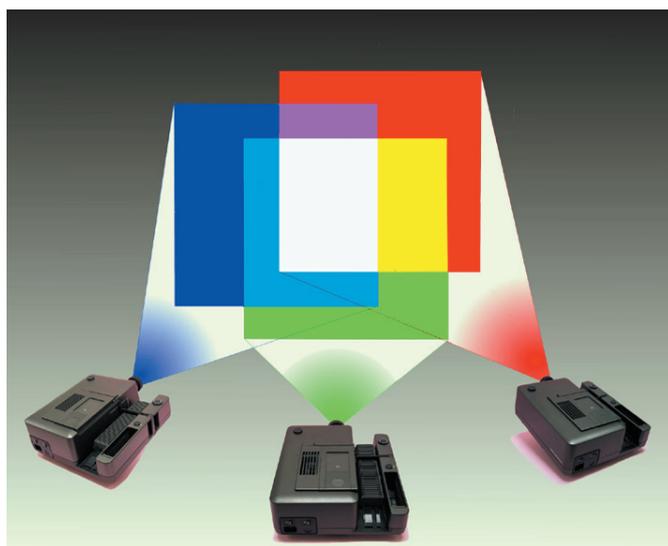


Figura 3.1.29 Sintesi additiva realizzata per addizione delle luci monocromatiche Blu, Verde, Rossa proiettate su uno schermo bianco diffusore: a due a due le sovrapposizioni dei fasci generano rispettivamente Giallo, Magenta e Ciano; la sovrapposizione dei tre produce il Bianco.



Figura 3.1.31 Sintesi sottrattiva realizzata per trasparenza a partire da luce bianca: a due a due la sovrapposizione dei filtri Giallo, Magenta, Ciano lasciano passare rispettivamente solo Rosso, Verde e Blu. La sovrapposizione dei tre filtri assorbe completamente la luce bianca e si ottiene il Nero.

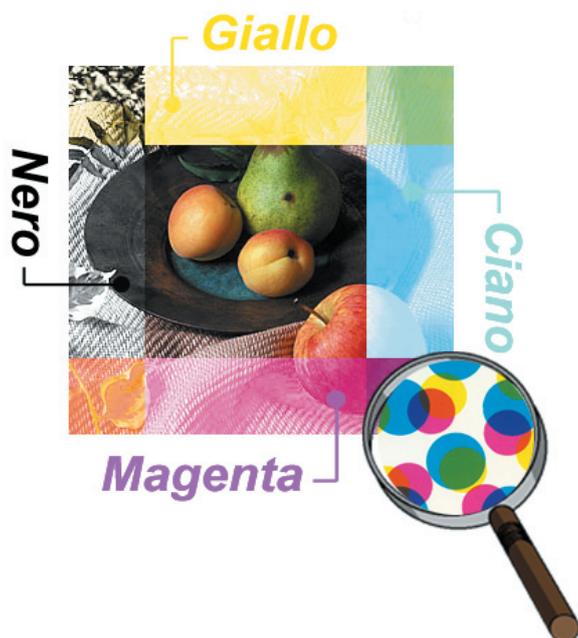


Figura 3.1.32 Le immagini stampate, ed in genere i prodotti fotografici a colori, sono il risultato di una sintesi sottrattiva, ottenuta attraverso la sovrapposizione dei piani relativi al ciano, magenta e giallo.

Misurazione del colore. Si è visto come la percezione umana del colore sia un fenomeno del tutto soggettivo influenzato da molti fattori, tra cui la condizione emotiva del momento. D'altra parte si è anche visto come siano stati sviluppati dei sistemi per la riproduzione oggettiva del colore che ci permettono di vedere immagini e filmati sul televisore di casa, o sul monitor del proprio computer, o stampati su carta.

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.

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 (fig. 31), 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.

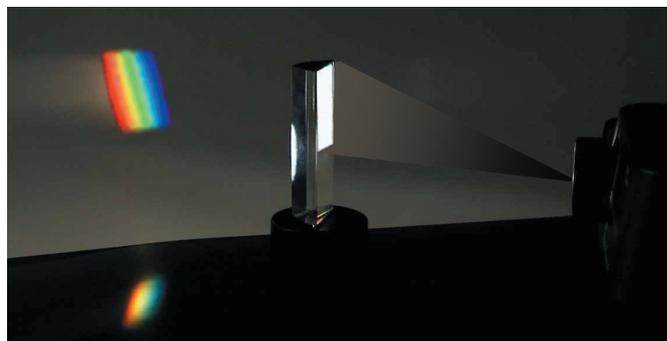


Figura 3.1.33 Il primo studioso a dimostrare per la prima volta il fenomeno dei colori fu Isaac Newton nel 1666, che fece passare un fascio di luce bianca attraverso un prisma triangolare che la scomponneva nei diversi colori dello spettro.

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.

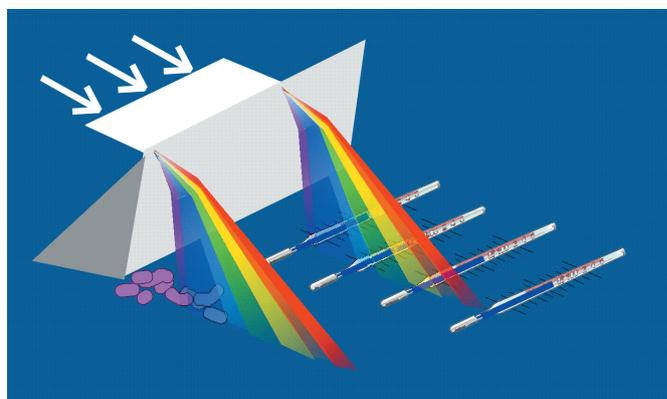


Figura 3.1.34 Posizionando dei termometri alle estremità dello spettro del visibile, cioè prima del blu e dopo il rosso, è possibile misurare anche l'energia di "colori" che non vediamo, cioè l'ultravioletto e l'infrarosso