

NUMERO: 2328A

ANNO: 2018

A P P U N T I

STUDENTE: Solazzo Enrico

MATERIA: Appunti di Telerilevamento - Prof. Boccardo

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTI E NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

Riassunti Telelavoramento - Teoria

1)

Telelavoramento (Remote Sensing), studia la realtà da punti di vista particolari, spettrali, radiometrici collegando osservazioni legate alla dinamica e alla fisica dei fenomeni osservati con quelle relative alla posizione spaziale. Nasce dopo la II G.M.

Il T.R. comprende tre fasi di sviluppo: ripresa dati, elaborazione dati e la loro interpretazione.

Caratteristiche:

- multispettraltà $\Rightarrow$ poter disporre di tante immagini dello stesso territorio riprese simultaneamente in varie bande dello spettro e.m.
- multitemporalità $\Rightarrow$ disporre di immagini riprese in tempi diversi per la stessa zona della Terra.

DEFINIZIONE: Disciplina scientifica che permette di ricavare informazioni qualitative e quantitative su oggetti posti a distanza e sull'ambiente circostante sulla base di misure di energia e.m. emessa, riflessa o trasmessa che interagisce con le superfici di interesse

$\Rightarrow$ l'osservabile misurato è l'energia e.m. proveniente dalle superfici in esame. Misurare questa grandezza significa quantificare le alterazioni che l'oggetto impone alla radiazione in termini di intensità, frequenza e polarizzazione e di conseguenza conoscere l'oggetto studiato.

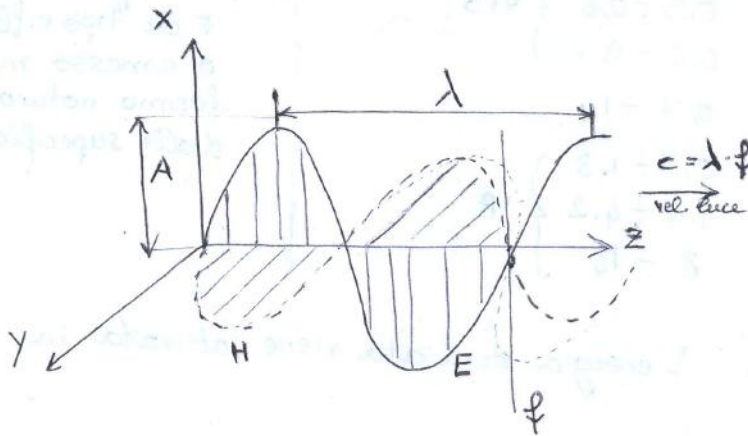
STRUMENTI PASSIVI: misurano le radiazioni emesse o riflesse ^{che} sono provenienti dalle superfici investigate

STRUMENTI ATTIVI: provvedono essi stessi all'illuminazione delle superfici captando poi la radiazione di ritorno

Applicazioni: controllo e monitoraggio ambientale, meteorologia, climatologia, agricoltura, militari, cartografia...

SPETTRO ELETTRONAGNETICO

energia radiante → onda armonica che si propaga nello spazio, composta da due campi di forza ortogonali tra loro ($\vec{H}$ ed $\vec{E}$).



λ : lunghezza d'onda [μm]
(distanza tra due picchi)

f : frequenza [Hz]
(n. di cicli per secondo che passano per un punto prefissato) [Hz]

A : ampiezza [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$]
(equivale all'altezza di ogni picco, e quindi $|\vec{E}|$). È espressa in termini di energia

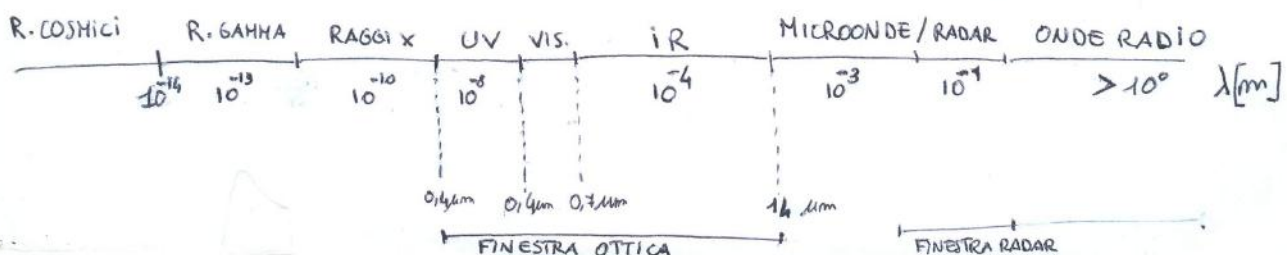
Per la luce nel visibile $c = 300.000 \text{ km/s}$

Quando un'onda e.m. è trasmessa all'interno di un preciso piano di vibrazione è detta POLARIZZATA.

Esistono infiniti piani di polarizzazione; tra i più usati si ricordano quelli adottati nei fenomeni di riflessione, dove:

1. La polarizzazione orizzontale si ha quando $\vec{E} \perp$ al piano di incidenza
2. La polarizzazione verticale si ha quando $\vec{E}$ è contenuto nel piano di incidenza
3. La polarizzazione è casuale quando $\vec{E}$ assume una posizione variabile rispetto al piano d'incidenza.

Lo spettro e.m. è una distribuzione monodimensionale continua dell'energia e.m. ordinata per λ crescenti. Lo spettro è INFINITO e CONTINUO



GRANDEZZE RADIOMETRICHE

5)

• Energia radiante Q : energia trasportata dalle onde e.m.; È legata all'energia trasportata sotto forma di pacchetti d'onda detti quanti o fotoni, la cui energia elementare q è data da:

h : costante di Planck
($h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

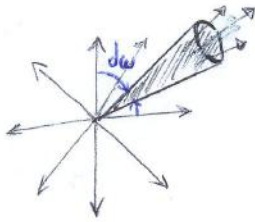
$$q = h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \Rightarrow Q = \sum_{i=1}^n q_i = \sum_{i=1}^n h \cdot \nu_i \quad [\text{J}]$$

$\Rightarrow$ le radiazioni ad onde corte sono più energetiche (es. sole)

• Flusso radiante ϕ : energia radiante trasferita nell'unità di tempo

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad [\text{W}]$$

• Intensità radiante I : flusso radiante uscente da una sorgente per unità di angolo solido $d\omega$ secondo una certa direzione



$$I = \frac{d\phi}{d\omega} \quad [\text{W/sr}]$$

• Irradianza E



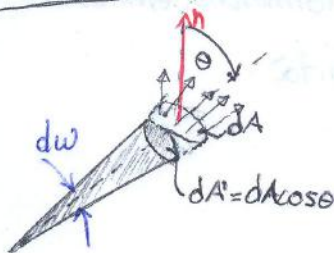
$$\frac{d\phi_{\text{incidente}}}{dA} \quad [\text{W/m}^2]$$

Emissionza M



$$\frac{d\phi_{\text{uscente}}}{dA} \quad [\text{W/m}^2]$$

Radianza L

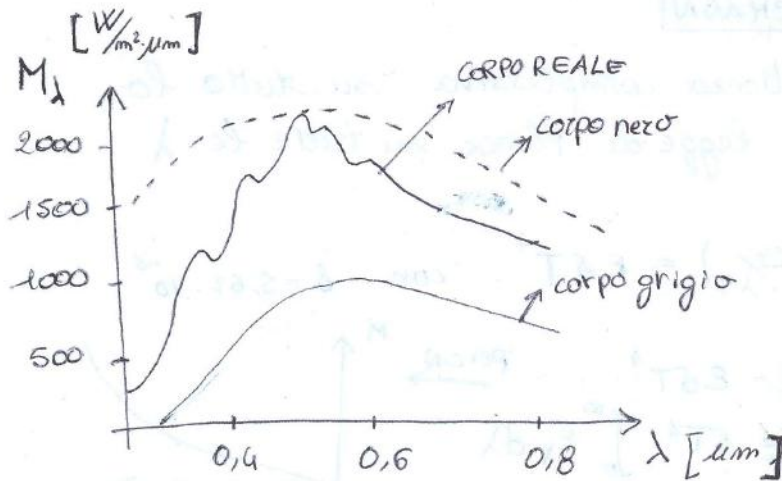


È il valore del flusso radiante per unità di superficie dA e di angolo solido $d\omega$, secondo una certa direzione e misurata su un piano ortogonale a tale direzione:

$$L = \frac{d\left(\frac{d\phi}{dA \cos \theta}\right)}{d\omega} = \frac{d^2\phi}{dA \cos \theta d\omega} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{sr}]$$

Per le superfici reali $\epsilon < 1$ e varia con la lunghezza d'onda λ

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{M_{\lambda}}{M_{\lambda}^{\text{corpo nero}}}$$



curve di emissività

1.

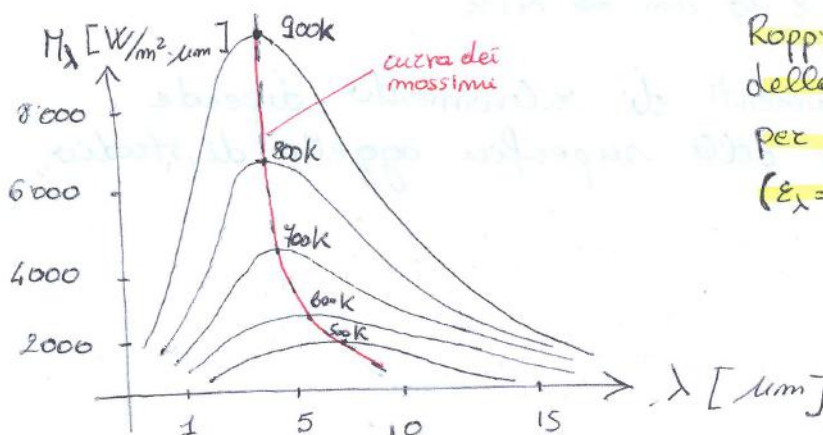
LEGGES DI PLANCK

Permette di calcolare per unità di superficie e di lunghezza d'onda λ , la densità di flusso radiante spettrale M_{λ} , emessa da un qualunque corpo

$$M_{\lambda} = f(h, c, k, \lambda, T, \epsilon_{\lambda})$$

$\uparrow$ c. Planck
 $\uparrow$ v. luce
 $\uparrow$ c. Boltzmann

$$M_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} \cdot c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right) \quad \text{con } c_1, c_2 \text{ costanti}$$



Rappresentazione grafica della legge di Planck per alcuni esempi di c.n ($\epsilon_{\lambda} = 1$)

BILANCIO ENERGETICO

9)

Quando la radiazione e.m. colpisce una superficie si ha che:

$$\phi_r + \phi_a + \phi_t = \phi_i$$

$$\Rightarrow \frac{\phi_r}{\phi_i} + \frac{\phi_a}{\phi_i} + \frac{\phi_t}{\phi_i} = 1 \Rightarrow \boxed{\rho + \alpha + \tau = 1}$$

ρ : coeff. riflettività

α : coeff. assorbività

τ : coeff. trasmissività

ρ, α, τ variano in funzione della natura chimico-fisica, rugosità e lucidatura di una superficie. Es. le nuvole o la neve appaiono bianche, cioè molto riflettenti, nel visibile, mentre sono praticamente nere, cioè poco o nulla riflettenti in alcune bande dell'infrarosso.

$\Rightarrow$ Variabilità spettrale dei coefficienti

Per corpi opachi (cioè impenetrabili dalla luce), τ è trascurabile

$$\Rightarrow \alpha + \rho = 1$$

$$\Rightarrow \alpha = 1 - \rho$$

Applicando il concetto che un buon assorbitore è anche un buon emettitore $\Rightarrow \boxed{\epsilon = 1 - \rho}^* \Rightarrow \boxed{\text{Legge di Kirchhoff}}$

$\Downarrow$

Per corpi opachi l'energia assorbita, e quindi emessa, in un certo intervallo spettrale, risulta complementare a quella riflessa e

Per corpi neri, in cui l'energia riflessa è nulla

$$\Rightarrow \boxed{\epsilon = \alpha = 1}$$

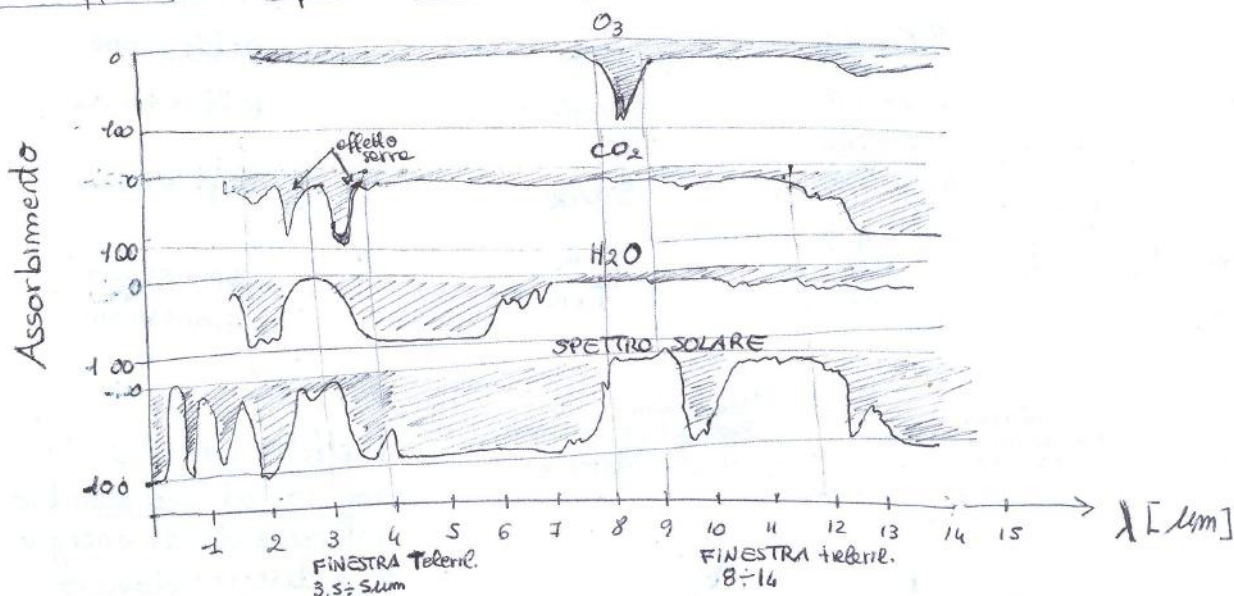
* Una superficie molto emissiva sarà quindi poco riflettente e viceversa. Tale principio vale solo per condizioni isoterme (cioè flusso che si scambiano due superfici è in equilibrio) e quindi non nel caso reale di acquisizione con sensori multispettrali

Gas

11)

l'assorbimento dipende dalla struttura molecolare di ciascun composto chimico costituente gassoso

la diffusione dipende dalla concentrazione molecolare



Ozono O_3 : • alto α nell'UV ($\lambda < 0.3 \mu m$) e tra 9 e 10 μm
• assorbe nel visibile ($\lambda = 0.6 \mu m$) $\downarrow E_{solare}$

$\Rightarrow$ Estremamente importante per la vita sulla terra.
È in continua produzione nella stratosfera.

Anidride solforosa (SO_2): Trasparente nel visibile, con forte potere assorbente nell'UV

Biossido d'azoto (NO_2): Presente nell'aria inquinata, di colore giallo-rossastro
Forte assorbimento nella regione spettrale del blu ($0.4-0.5 \mu m$)

Vapore acqueo (H_2O): Assorbimento variabile nello spettro con massimi a 0.9, 1.1, 1.4, 1.9, 2.6 μm

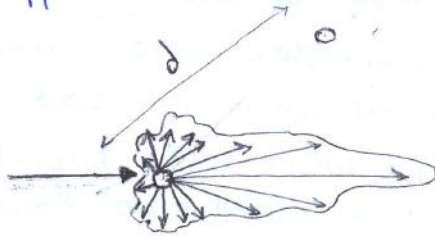
O_2 , CO_2 , CO , CH_4 e N_2O assorbono nell'infrarosso

O_2 ha inoltre un picco di assorbimento nel visibile, fino al 50%

L'assorbimento ad opera della CO_2 per $\lambda > 1.5 \mu m$ è il maggior responsabile dell'effetto serra; * Se l'energia nel NIR viene fortemente trasmessa, quella emessa nell'infrarosso lontano (onde lunghe) viene fortemente assorbita dagli aerosol e alcuni gas come CO_2 e H_2O .

1. Diffusione di Mie sulle particelle più voluminose

(13)



Hip: • particelle sferiche, perfettamente non assorbenti ed indice di rifrazione specifico n

• $r_{\text{particella}} > \lambda$

• particelle spazialmente indipendenti ($d > 3r_{\text{particella}}$)

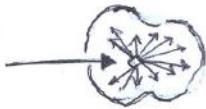
N.B affinché ci sia diffusione singola deve valere $d > 3r_{\text{particella}}$

ciò si verifica in presenza di aerosol in condizione di spessore ottico limitato, quando circa il 75% dell'energia è trasmessa

2. Diffusione di Rayleigh sulle molecole dei gas

→ su molecole di gas

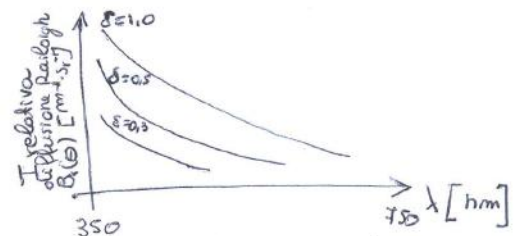
→ dim particelle $\ll \lambda$



Rayleigh ha ricavato una legge generale che fornisce l'intensità della luce riflessa $B_r(\theta)$ secondo un angolo θ di diffusione in cui m è il numero di molecole presenti per unità di volume ed n l'indice di rifrazione specifico

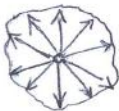
⇒ la legge di Rayleigh è funzione

- della lunghezza d'onda
- della densità atmosferica



Per una data dimensione di una particella, le onde più lunghe vengono diffuse in maniera meno efficiente di quelle corte. (*)

3. Diffusione non selettiva



→ dim particelle $\gg \lambda$

→ diffonde tutto lo spettro e.m.

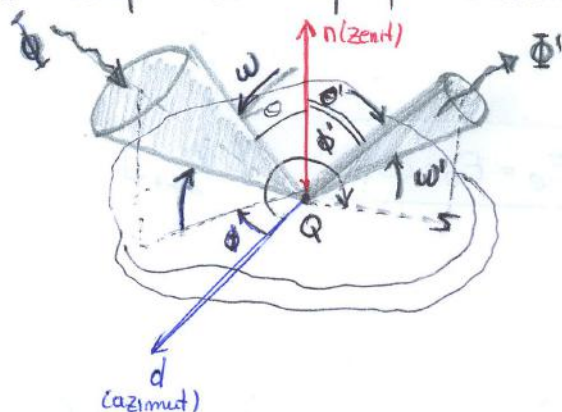
Se $r_{\text{part}} \gg \lambda$, la diffusione è indipendente da quest'ultima e interessa indifferentemente tutto lo spettro e.m. ⇒ tutte le radiazioni sono diffuse in maniera uguale. Es. il colore bianco delle nubi è legato alla forte azione di diffusione nei confronti di tutte le λ incidenti e a bassissimi valori di assorbimento

Interazione tra energia e superficie

15)

Geometria della radiazione

⇒ Studio descrittivo delle relazioni di posizione della sorgente e del sensore rispetto alle superfici osservate.



flusso
uscite

→ opice " " → riferiti alla direzione
di osservazione

Premessa:

Le superfici naturali
si comportano in maniera
anisotropa, cioè dirigono
la radianza in maniera
non uniforme in funzione
della loro struttura e
geometria.

⇒ Modelli di riferimento

- propagazione direzionale
- propagazione conica
- propagazione emisferica

Superficie Lambertiana

superficie il cui valore di radianza osservata $L(\theta', \phi')$ risulta
costante per qualunque geometria tra la sorgente e il punto
di osservazione ⇒ diffusore integrale ⇒ modello ideale
Nel caso di perfetto diffusore:

$$\Rightarrow I(\theta', \phi') = I(0, \phi) \cdot \cos \theta'$$

intensità
radiante
osservata

intensità
radiante
incidente
secondo
la normale

θ' = angolo di vista

Il valore di intensità radiante
in uscita si smorza in maniera
lineare all'aumentare di θ'
secondo la legge del coseno
o legge di Lambert

$$I(\theta', \phi') = L(\theta', \phi') \cdot \cos \theta' \cdot \Delta A$$

$$\Rightarrow I(0, \phi) \cdot \cos \theta' = L(\theta', \phi') \cos \theta' \cdot \Delta A$$

$$\Rightarrow \boxed{L(\theta', \phi') = \frac{I(0, \phi)}{\Delta A}} \quad [W m^{-2} sr^{-1}]$$

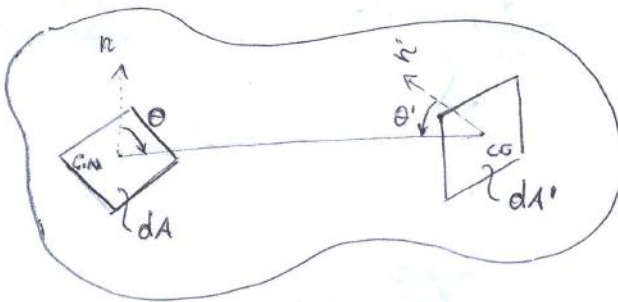
⇒ Nei casi di superfici o mezzi con comportamento Lambertiano,
la radianza osservata $L(\theta', \phi')$ non dipende dalla geometria di
osservazione, ma semplicemente dall'intensità di flusso radiante
secondo la normale $I(0, \phi)$ e dall'estensione dell'area interessata ΔA

3. Condizioni di flusso radiante nello spazio emisferico ¹⁷

$$M = \int_{\omega} L \cos \theta \, d\omega \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

→ L'angolo solido $d\omega$ che sottende l'area dA interessata dal flusso radiante proveniente da Q è esprimibile mediante una funzione degli angoli θ e ϕ

Dimostrazione teorema di Kirchhoff



Si pongono in una cavità radiante due superfici infinitesime, rispettivamente di c.n. e di c.g.

In condizioni isoterme il flusso che si scambiano le due superfici deve essere in equilibrio.

Calcolando il flusso radiante da dA a dA' :

$$dP_{cn} = M_{cn} \cdot \frac{dA \cos \theta \cdot dA' \cos \theta'}{r^2}$$

quantità di energia da dA a dA'

$$dP_{cg} = M_{cg} \cdot \frac{dA' \cos \theta' \cdot dA \cos \theta}{r^2}$$

quantità di energia emessa da dA' verso dA

dA' essendo di corpo grigio riflette il flusso radiante proveniente da dA . Ricordando che $f = 1 - \alpha$, la q. di energia riflessa da dA' sarà:

$$dP_{cg} = dP_{cn}(1 - \alpha)$$

Eguagliando i flussi, essendo in condizioni isoterme: $dP_{cn} = dP_{cg}$

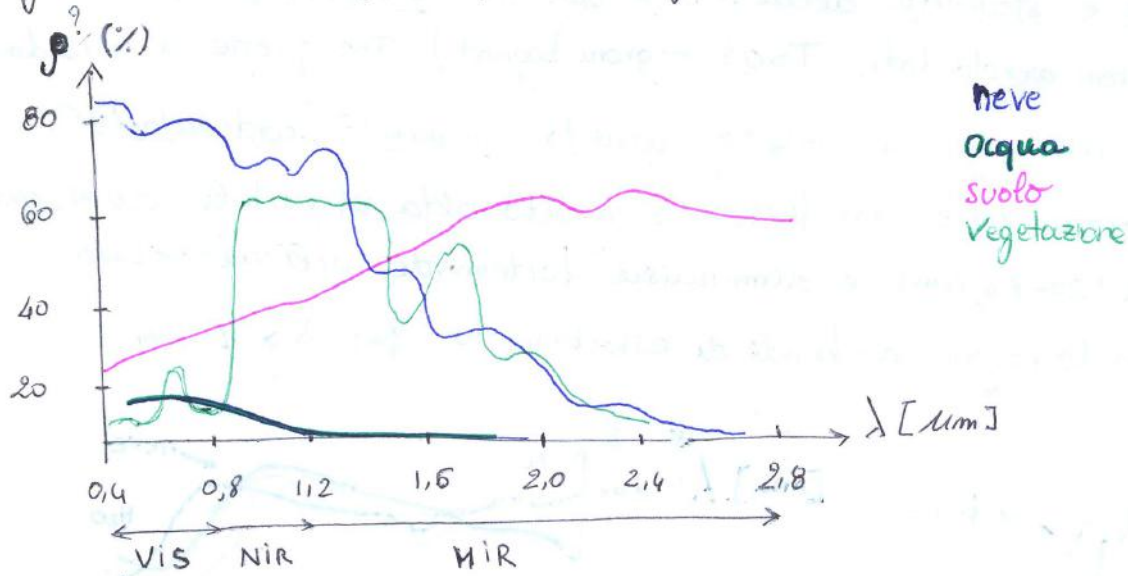
$$\Rightarrow M_{cn} \cdot \frac{dA \cos \theta \cdot dA' \cos \theta'}{r^2} = [M_{cg} + M_{cn} \cdot (1 - \alpha)] \cdot \frac{dA \cos \theta \cdot dA' \cos \theta'}{r^2}$$

$$\Rightarrow M_{cn} = M_{cg} + M_{cn} - \alpha M_{cn} \Rightarrow \alpha = \frac{M_{cg}}{M_{cn}} = \epsilon$$

Firme spettrali

19)

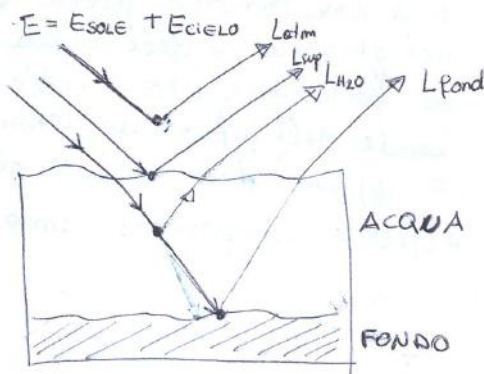
Indicano come varia la riflettività in funzione della lunghezza d'onda per superfici omogenee.



Acqua

(3%) → confinata alle bande blu-verde *

bassissima riflettività, alta trasmissività nel vis ⇒ incolore

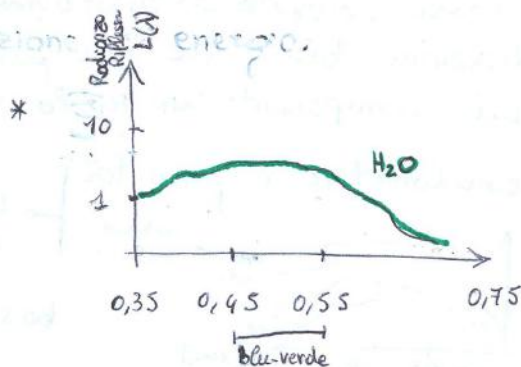


E_{sole} = irradianza solare
 E_{cielo} = irradianza diffusa

$$L(\lambda) = L_{atm}(\lambda) + L_{sup}(\lambda) + L_{H_2O}(\lambda) + L_{fondo}(\lambda)$$

La radianza osservata $L(\lambda)$ è registrata da uno strumento che rileva una superficie d'acqua è composta da 4 componenti:

$L_{H_2O}(\lambda)$ è la componente di interesse nello studio dell'acqua

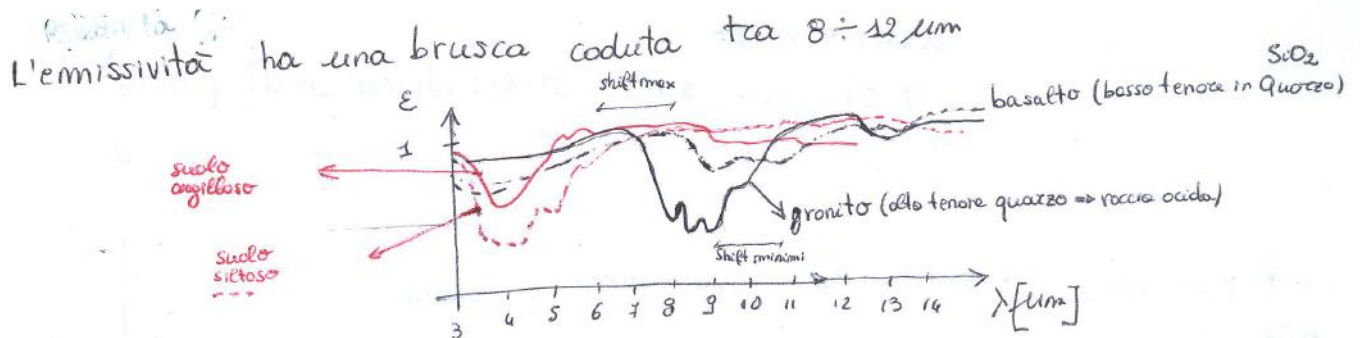


Rocce

Hanno curve di riflettività variabili.

TIR

Nel campo della litologia l'intervallo spettrale di interesse è $8 \div 14 \mu\text{m}$
 $\Rightarrow$ il contenuto di silicio influenza la trasmissività spettrale,
 spostando i picchi dei massimi e minimi relativi in funzione
 inversa al tenore di silice $\Rightarrow$ lo spostamento è conforme
 alla basaltica



Anche l'inerzia termica e la capacità termica sono tra le caratteristiche
 distintive spesso utilizzate in T.L per la distinzione dei suoli e dei
 litotipi rocciosi: la granulometria e la loro matrice regolano e
 evidenziando nella banda dell'infrarosso medio $3-5 \mu\text{m}$ una netta
 differenza tra suoli sabbiosi e siltosi

Vegetazione

È considerata la firma spettrale per eccellenza. La riflettanza
 spettrale, in funzione di λ dipende da:

1. Pigmenti fogliari: Nel visibile la porzione di energia riflessa
 è correlata alla presenza di pigmenti fogliari quali
 - clorofilla $\rightarrow$ (assorbe nel blu $\sim 0,45 \mu\text{m}$ e nel rosso $\sim 0,66 \mu\text{m}$ -
 65% dei pigmenti con picco di riflettività nel verde $0,50 \mu\text{m}$)
 - carotenoidi $\rightarrow$ impartiscono toni giallo-arancio alle foglie
 prive di clorofilla
2. Struttura fogliare: è l'organizzazione spaziale delle foglie,
 responsabile del comportamento spettrale nel NIR ($0,7 \div 1,35 \mu\text{m}$)
 provocando elevata riflessione. $\Rightarrow$ strumento di indagine
 per discriminare specie diverse, stadi evolutive e patologie

Teoria della tricromaticità (Young-Helmholtz)

23)

Tale teoria si basa sul fatto sperimentalmente noto che a partire da tre colori di partenza ben precisi (blue, verde e rosso) si potessero creare tutti i colori, incluso il bianco, modulando la potenza di tre fasci luminosi relativi ai colori di base detti colori primari per addizione

Additiva	B+V B+R V+R B+V+R	ciano Magenta giallo bianco
Sottrattiva	B-R B-V B-B B-B-V-R	ciano Magenta giallo Nero

colori primari per sottrazione

Sulla base di tali risultati Young cercò di spiegare la fisiologia dell'occhio umano e avanzò l'ipotesi che ci fossero tre tipi diversi di fotorecettori sensibili al Blue, Verde e Rosso, dalla cui stimolazione parziale e simultanea potessero risultare le sensazioni di tutti gli altri colori.

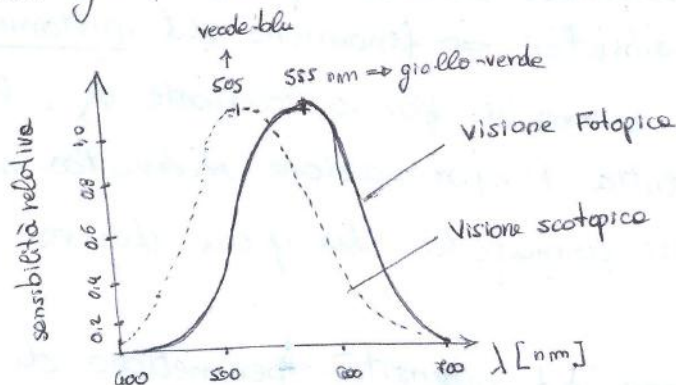
VISIONE STEREOSCOPICA: L'osservazione di oggetti non troppo lontani viene effettuata da un punto di vista leggermente diverso; le risultanti immagini retiniche non saranno quindi perfettamente uguali (come nel caso di visione binoculare osservando un oggetto lontano) e tali lievi variazioni sono alla base del senso della profondità (senso stereoscopico)

In tutti gli animali la visione è basata sul funzionamento dei fotorecettori il cui compito, come nell'uomo, è quello di ricevere e trasformare l'energia radiante in impulso elettrico che viene poi trasmesso al cervello. Il problema è capire come l'occhio trasmette al cervello stimoli nervosi diversi e specifici per ogni λ della luce che colpisce la retina.

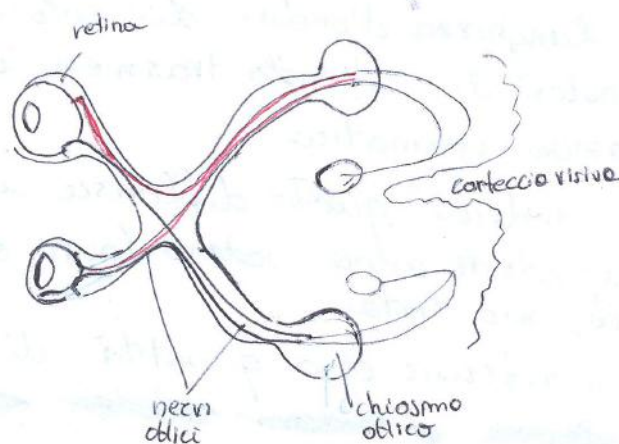
25)

Hanno buona risoluzione spettrale e geometrica (visione fotopica).
I bastoncelli intervengono in condizione di scarsa luminosità
essendo dotati di buona risoluzione radiometrica e limitato
visione spettrale (visione scotopica)

Il valore delle tre diverse porzioni di sensibilità spettrale dei tre
fotorecettori produce il diagramma di sensibilità spettrale
media globale dell'occhio umano durante la visione fotopica

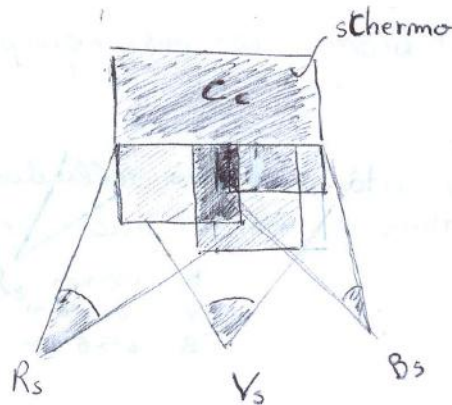


Il picco di sensibilità per
la visione fotopica è a
555 nm, corrispondente al
valore massimo di irradianza
solare al livello del mare!
(guarda caso ☺)



Schema di funzionamento
del chiasma ottico: i due
nervi ottici si separano
in due metà relative
alle parti dx e sx del
campo visivo, per poi
ricongiungersi e arrivare
rispettivamente alla
parte sx e dx della
corteccia cerebrale, dove
il segnale è analizzato
e interpretato

Schema per la riproduzione di un colore per la determinazione dei coeff. di tristimolo: 27)

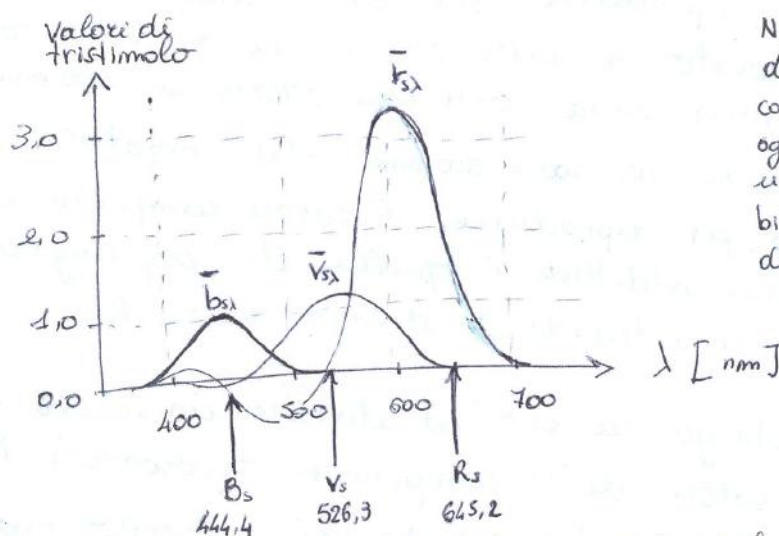


Tre fasci di luce bianca, provenienti da 3 proiettori con intensità regolabile, vengono filtrati con tre primari R_s, V_s, B_s ed illuminano la parte inferiore di uno schermo bianco di tipo Lomberton. Nella

parte superiore dello schermo viene posto un colore campione C_c di cui si vuole determinare le caratteristiche. Quando l'osservatore, regolando l'intensità dei 3 fasci di luce, non vede più la separazione tra le due facce di schermo, significa che il colore C_s riprodotto per sintesi è equivalente a C_c .

⇒ sono determinate le proporzioni di luci primarie blu, verde e rossa presenti nel colore C_c rispetto alla sensibilità dei tre fotoricettori dell'occhio umano, detti valori di tristimolo.

Risultato sono le funzioni di tristimolo o di corrispondenza cromatica (colour matching) $r_s(\lambda), v_s(\lambda), b_s(\lambda)$ che descrivono le quote parti necessarie computate su tutto lo spettro del visibile e relative ai tre primari per ottenere l'esatta percezione di C_c .



N.B.: la scelta dei primari va fatta con il criterio che ognuno di essi sia un colore non riproducibile mediante sintesi degli altri due.

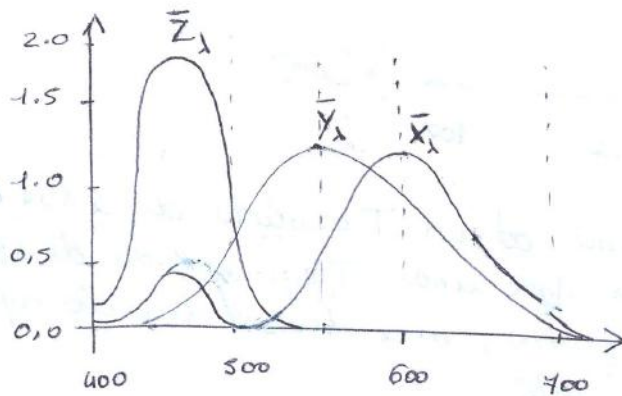
Funzioni medie di tristimolo risultanti dagli esperimenti su una popolazione di 76 individui sulla base delle tre luci monocromatiche mediante la stimolazione provocata da vari colori C_c dello spettro messi a confronto con altri colori C_s ottenuti per sintesi additiva dei tre primari.

di nuova tripletta di primari, X, Y, Z tali per cui i valori di tristimolo prodotti x, y, z mediante le equazioni: 29)

$$\begin{cases} X = 0,49000R + 0,31000V + 0,2000B \\ Y = 0,17697R + 0,81240V + 0,9036B \\ Z = 0,00000R + 0,01000V + 0,99000B \end{cases}$$

dove i coefficienti soddisfano le condizioni:

- somma totale = 1 $\Rightarrow$ se $R=V=B$ allora $x=y=z$
- $x, y, z > 0$
- y è proporzionale al flusso luminoso di colore presente perché nella 2a equazione i coeff. mantengono gli stessi rapporti dei coeff. visti f_R, f_V, f_B . Analogamente si possono ricavare le funzioni di tristimolo $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$ in funzione di $r(\lambda), v(\lambda), b(\lambda)$



funzioni definitive
di tristimolo
 $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$

* Il sistema cromatico x, y, z della CIE implica solamente due funzioni spettrali $x(\lambda)$ e $z(\lambda)$, oltre alla funzione $V(\lambda)$ già definita in fotometria.

Le funzioni di tristimolo definitive $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ adottate dalla CIE nel 1931 come funzioni standard, risultano dall'interpolazione di quelle sperimentali, modificate al fine di assicurare la guidistribuzione dei tre stimoli nella definizione del colore anche al fine di mantenere positivi tutti i valori delle funzioni stesse.

Caratteristiche dei sistemi di osservazione

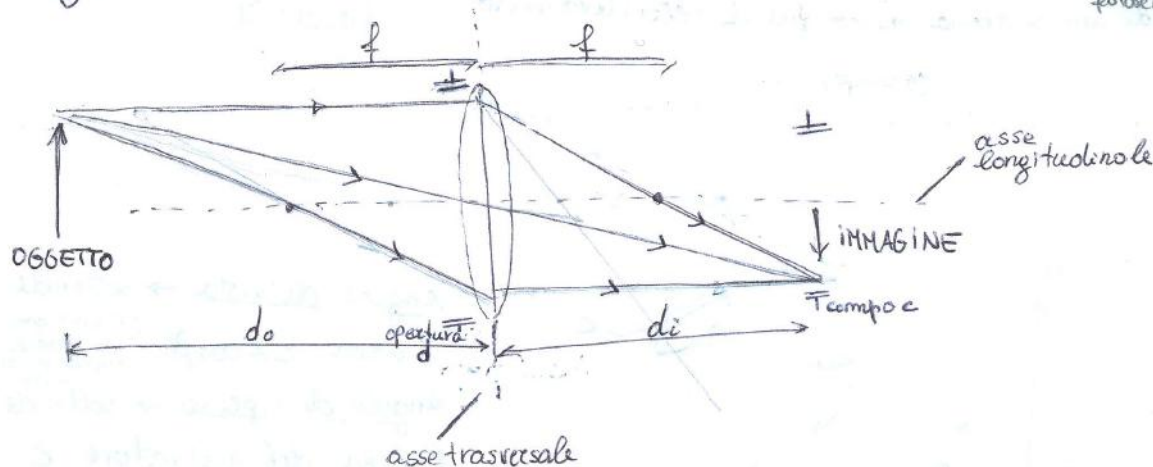
33)

I dati di telecameramento sono rappresentazioni di scene reali, quindi il risultato di un processo di trasferimento, la cui fedeltà è legata alla risoluzione.

Elemento chiave nella fase di acquisizione sono le caratteristiche delle parti ottiche degli strumenti il cui ruolo è quello di convogliare l'energia raggiante sul sensore

Schema generale di un sistema ottico a lente sottile:

f : distanza della lente dall'elemento fotosensibile



Le distanze focali f del sistema sono identiche e vale la relazione

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i}$$

⇒ Un oggetto posto a distanza d_o sull'asse della lente positiva di focale f , proietterà su uno schermo a distanza d_i la propria immagine

Il valore di apertura d determina la capacità di un sistema di cogliere energia luminosa

Il rapporto f/d , detto numero guida definisce le caratteristiche di un obiettivo rispetto alla sua capacità di captare energia luminosa. Se $\uparrow f/d$ $\downarrow$ la capacità dell'obiettivo di cogliere energia luminosa.

in Televis.

Il valore $d_o \gg$ delle altre grandezze in gioco $\Rightarrow f = d_i \Rightarrow$

il piano di acquisizione, dove si forma l'immagine, coincide con il piano focale dell'obiettivo

35)

Uguagliando i due termini in relazione ad r^2

$$\frac{\Delta A \cos \theta}{\beta^2} = \left(\frac{c}{\Delta w} \right)^2 = r^2 \Rightarrow \Delta A \cos \theta \Delta w = \beta^2 c$$

$\Rightarrow$ dato un certo sistema ottico il prodotto tra l'area rilevata al suolo e l'angolo solido di ripresa rimane costante, indipendentemente dalla distanza, e tale valore equivale al prodotto tra le due caratteristiche strumentali del sistema: l'angolo solido di vista β^2 e l'area del rilevatore c

$\Rightarrow$ Il flusso radiante ϕ raccolto da un generico sensore in una $\forall$ posizione dello spazio vale:

$$\phi = L \Delta A \cos \theta \Delta w = L \beta^2 c$$

Indipendente dalla distanza di osservazione r e dall'angolo θ di inclinazione della superficie ma proporzionale al valore di radianza e alle due caratteristiche strumentali: angolo solido di vista β^2 e superficie del rilevatore c

Fattore di scala

Rapporto tra la distanza di due punti sull'immagine acquisita e la distanza reale corrispondente al suolo

È il rapporto di riduzione con cui una scena finale viene ripresa da un sistema di acquisizione ed è definito come:

$$s = \frac{f}{H}$$

f : lunghezza focale del sistema

H : distanza sensore-scena

Risoluzione

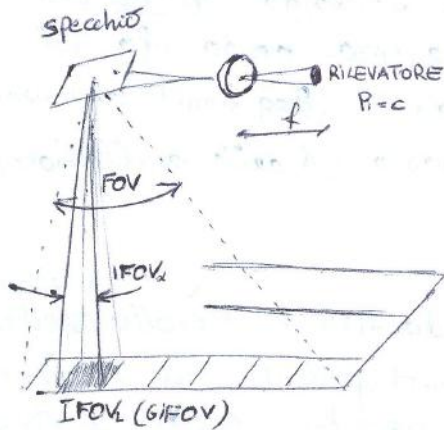
Risoluzione geometrica: distanza minima necessaria per mantenere distinti due oggetti contigui di date dimensioni.

A parità di risoluzione geometrica, la separabilità di due oggetti diversi, oltre che alla loro dimensione è legata al loro contrasto radiometrico, ossia quella caratteristica che permette di distinguere oggetti anche quando le loro dimensioni risultano inferiori a quelle teoriche rilevabili dal sistema.

(Angolo) Campo di vista e risoluzione geometrica

37)

A seconda degli strumenti impiegati l'angolo (o campo) di vista β di un sistema ottico può assumere significati differenti:



- FOV (Field of View) = campo totale di vista
- IFOV (Instantaneous Field of view) → riferito all'angolo più piccolo risolvibile da un sistema.

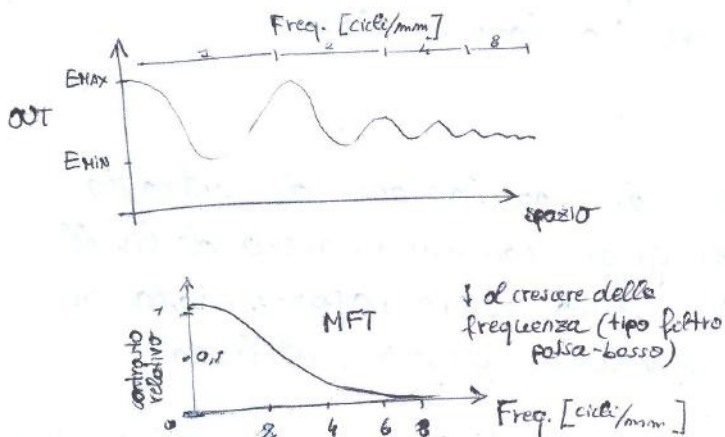
$$IFOV_L = P_L = P_I \cdot \frac{H}{f} = \frac{P_I}{\delta} \quad [\text{m}] \quad \text{risol. geom. lineare}$$

$$IFOV_\alpha = P_\alpha = \frac{P_I}{f} = \frac{P_I}{\partial H} \quad [\text{rad}] \quad \text{risol. geom. angolare}$$

FOV fa riferimento all'angolo complessivo di vista di un sistema (es. angolo sconsiore radar)
IFOV fa riferimento all'angolo più piccolo risolvibile dal sistema,
 ad esempio quello sotteso da un rivelatore negli strumenti ottico-elettronici

Le caratteristiche effettive di rendimento di un sistema dipendono anche da condizioni di tipo dinamico (oltre che geometriche) come il movimento relativo del sensore rispetto al suolo (blur cicli). È necessaria una relazione tra le modulazioni del segnale in entrata e quello in uscita

La funzione MTF (Modulation Transfer Function) descrive la modulazione di contrasto rispetto alla frequenza spaziale



Aumentando la frequenza, lo smussamento degli spigoli produce anche una riduzione dell'ampiezza del segnale in uscita

Al fine di esprimere in termini quantitativi il grado di fedeltà e di coerenza di un'immagine rispetto alla scena rilevata si usa la funzione di trasferimento della modulazione di contrasto, espressa in termini di frequenza spaziale ν ,

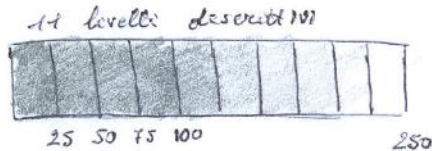
mentre la riduzione della stessa facilità o l'individuazione di alcuni elementi nella scena rispetto ad altri. 39)

Un altro modo di esprimere la risoluzione radiometrica è il riferimento alla capacità di un sistema di rilevare un minimo valore di radianza, cui corrisponde il livello di discretizzazione del segnale radiometrico. $\Rightarrow$ N. di livelli in cui può essere scomposto il segnale originario.

a)

$$C_H = \frac{250-0}{250-0} = 1$$

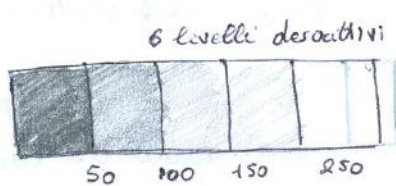
$$\Delta L = 25 \text{ DN}$$



b)

$$C_H = \frac{250-0}{250-0} = 1$$

$$\Delta L = 50 \text{ DN}$$



confronto tra due scale con uguale valore di modulazione di contrasto ma $\neq$ gamma descrittiva di grigi. La scala relativa alla scena reale in (a) viene riprodotta prendendo in numero di livelli

di grigio descrittivi (b). Questo induce automaticamente un aumento di contrasto tra un livello e l'altro.

Risoluzione temporale

È legata alla possibilità di ripetere le osservazioni a cadenze temporali costanti o programmabili. La risoluzione temporale può andare da frazioni orarie (sat. Meteor. geostazionari) a 15-35 gg per i sat. eliosincroni polari. Svolge un ruolo importante riguardo aspetti come: la scelta dei passaggi, disponibilità dei passaggi, quantità di dati

Considerazioni

Alta risoluzione geometrica corrisponde bassa risoluzione temporale
Alta risoluzione radiometrica corrisponde minor res. geom. o spettrale
Nel dimensionamento spettrale di un sensore si deve sempre tener conto sia della sua risoluzione geometrica al suolo ma anche della risoluzione radiometrica, nel senso che bande spettrali troppo strette implicherebbero valori di flusso radiante troppo esigui da poter essere rilevati entro una dinamica opportuna di rappresentazione
 $\Rightarrow$ compromesso tra le caratteristiche spettrali e geometriche

Strumenti di osservazione e misura

40

Sensore: dispositivo in grado di registrare l'energia e.m. proveniente da una scena e di convertirla in segnale elettrico o ottico.

Nei sistemi ottici, l'energia e.m. viene convogliata nel fuoco del sistema dove è posto un rilevatore (detector) che trasduce la potenza incidente in un effetto foto-chimico o in tensione elettrica.

Dal momento che il flusso radiante è misurato in un periodo di tempo piccolo, la grandezza che si registra è di fatto energia. L'interesse è in particolare nelle variazioni spettrali e spaziali del flusso radiante

RILEVATORI A STRUTTURA CCD



Sono di tipo elettrico, e servono per l'acquisizione di immagini. Sono ~~nelle~~ ^{proiettate} posti in linea (detector array) strutturati in modo tale che ognuno di essi accumuli una carica che viene poi tradotta in segnale ^{analogico} da un apposito sistema detto CCD (Charge Coupled Device) e trasferita ad un circuito elettrico in maniera sequenziale. Il segnale viene quindi tradotto e registrato in forma digitale.

CALIBRAZIONE DEI SENSORI

- Calibrazione geometrica si intende la necessità di coerenza interna tra i pixel e il mantenimento della correttezza proiettiva dell'immagine rispetto alla scena
- Calibrazione spettrale $\Rightarrow$ corrispondenza tra informazione spettrale rilevata con quella al suolo
- Calibrazione radiometrica $\Rightarrow$ correlare il segnale osservato alla radianza effettiva ^L che raggiunge il sensore

Il segnale prodotto dal sensore viene sempre confrontato con una sorgente standard di radianza di riferimento.

PRE-ELABORAZIONI RADIONETRICHE

41bits

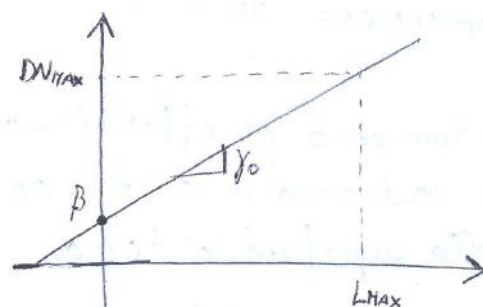
Per analizzare lo stato delle superfici e i loro cambiamenti nel corso del tempo in modo quantitativo e consistente occorre basarsi su una serie di misure confrontabili.

Per questo i DN devono essere trasformati in grandezze fisiche che devono essere il più possibile indipendenti dalle possibili cause di variabilità quali il tipo di sensore usato, l'IFOV, orbita ecc.

⇒ Risulta indispensabile stabilire l'esatta relazione tra energia radiante che arriva al sensore $\hookrightarrow$ e le immagini fornite dal sistema di osservazione ⇒ CALIBRAZIONE RADIONETRICA

In prima approssimazione si assume che l'energia radiante che arriva al sensore sia distribuita uniformemente e che quindi la radianza L sia costante su tutta la superficie A dell'intera cella di risoluzione associata al pixel e al suo DN. Il DN in corrispondenza di ogni cella è una funzione della radianza L [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$] misurata dal sensore nella particolare banda di acquisizione e della risposta caratteristica del sistema. Assumendo tale relazione lineare ne segue che $\boxed{\text{DN} = \beta + \gamma_0 L}$

La relazione invertita viene utilizzata nelle fasi di calibrazione radiometrica dei dati per ricavare i valori di radianza dai DN delle celle dell'immagine



$$L = \frac{\text{DN} - \beta}{\gamma_0} = g \text{DN} + b$$

con g e b costanti di calibrazione

Sistemi passivi

42)

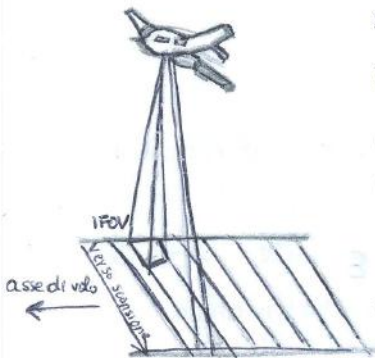
Rilevano energia e.m. presente nell'ambiente e originata da sorgenti naturali, come il sole, senza bisogno di provvedere artificialmente alla loro attivazione.

SISTEMI A SCANSIONE: scanner

Si tratta di sistemi che sono in grado, attraverso una sequenza ordinata di misure nello spazio, di riprodurre una scena bidimensionale, restituendola sotto forma di immagine, normalmente digitale, secondo una matrice di celle elementari che corrispondono ai pixel dell'immagine. A seconda di come vengono effettuate le misure si possono avere due modalità di rilevamento:

1. SCANNER WHISK-BROOM (a scansione ottica)

Configurazione: uno specchio inclinato di 45° , rispetto all'asse del moto del vettore (aereo o satellite) mantenuto in rotazione a numero di giri costante da un motore, devia le radiazioni provenienti dal suolo verso un sistema ottico di raccolta delle radiazioni. L'esplorazione del suolo avviene in modo ordinato e sequenziale tramite una serie di strisce contigue.



La potenza raccolta da uno scanner, e convertita poi dal rilevatore in tensione elettrica, è data da: $P = T \cdot L_\lambda A^2 \Delta\lambda$

T : coeff. trasmissione atmosferica

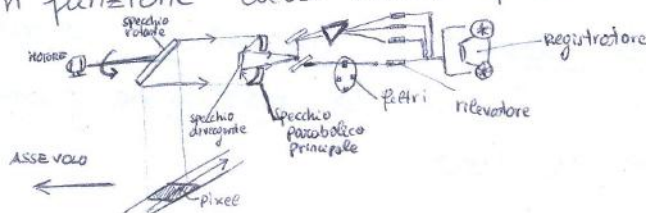
L_λ : radiazione proveniente dal suolo

A : area dello specchio parabolico principale

Δ : angolo di risoluzione ottica dello strumento

$\Delta\lambda$: intervallo spettrale in cui funziona lo strumento

Nei sistemi multispettrali si ha l'azione intermedia di un prisma selettore in funzione delle bande spettrali previste



Scanner multispettrale

L'acquisizione del dato avviene attraverso lo scambio di ~~energia~~ ⁴⁴⁾ tra due superfici, quella da rilevare e quella del sensore: tale scambio provoca un'alterazione del sensore che viene sfruttata per rendere in forma di dato puntuale (radiometro) o di immagine (scanner) l'intensità della radiazione raccolta.

Le caratteristiche delle due bande utili si possono sintetizzare come:

Banda 3-5 μm :

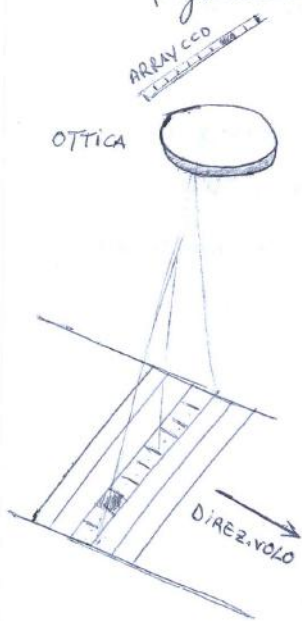
- ✓ adatta a temp. superiori a quelle ambiente
- ✓ risente dell'attenuazione dell'atmosfera
- ✓ le superfici hanno elevati valori di emissività
- ✓ risente della radiazione solare riflessa

Banda 8-14 μm :

- ✓ Più adatta a temp. intorno a quelle ambiente
- ✓ risente meno dell'attenuazione atmosferica
- ✓ le superfici hanno valore di emissività **poco** elevati
- ✓ risente poco della radiazione solare riflessa

2. SCANNER PUSHBROOM (a scansione elettronica o statica)

Configurazione: Si tratta di sistemi elettronici in linea, la cui parte sensoriale è costituita da un insieme di rilevatori, generalmente ccd tutti allineati tra loro. Essi vengono "interrogati" singolarmente da un velocissimo dispositivo elettronico: l'insieme ordinato delle risposte costituisce la linea di acquisizione, formata da un numero di pixel pari al numero dei rilevatori. Uno scanner Push-broom ha un'ottica attraverso la quale l'immagine di una striscia di scansione è letta istantaneamente dall'array di ccd. Eseguita la lettura il sistema attende lo spostamento della piattaforma, aereo o satellite, fino al momento in cui legge ~~legge~~ la striscia di scansione contigua successiva.



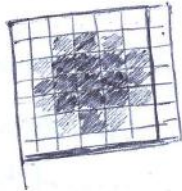
Vantaggi rispetto a sistema push-broom:

- assenza di parti in movimento $\Rightarrow$ no vibrazioni
- assenza di campionamento spaziale del segnale (nona già discreti) anche se non digitale

Svantaggi:

- Difficoltà di costruzione di un array con detector identici
- necessità periodica di calibrazione di tutti i detector

Non appena scattata la "fotografia", e quindi dopo che i 49 ccd 46) hanno assunto una carica elettrica proporzionale alla quantità di luce incidente, inizia il processo di trasferimento delle cariche riga per riga al registro, quindi al convertitore A/D e quindi alla memoria.



9	9	9	9	9	9	9
9	9	7	5	7	9	9
9	7	0	0	0	7	9
9	5	0	0	0	5	9
9	7	0	0	0	7	9
9	9	7	5	7	9	9
9	9	9	9	9	9	9

sensori a matrice digitale

sia un'immagine a colori. La macchina digitale ha a disposizione tre tipi di ccd, sensibili al B, V, R.

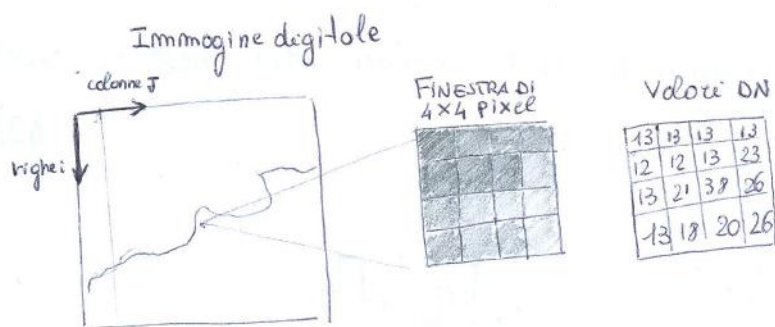
La selettività spettrale dei ccd è data da un filtro (o B o V o R) interposto tra la microlente e il ccd stesso.

Il problema che sorge è quello che, come in una scacchiera, non si può riempire lo spazio con elementi quadrati (pixel) in proporzione di $33,33\%$, dando un peso spaziale uguale ai 3 ccd. Si adotta lo schema di Bayer riempiendo lo spazio al 50% con ccd sensibili al verde e 25% al R e 25% al blue.



Poiché ogni ^{ccd} pixel ha una misura fisica solo del colore di competenza, mentre non misura le altre due componenti cromatiche, si attribuisce ai valori non misurati un valore che è l'interpolazione lineare dei valori misurati nell'intorno.

A/D per essere visualizzati su monitor. Essi sono detti DIGITAL NUMBER (DN)



48)

Il concetto di pixel porta associato ad esso i concetti di risoluzione

Risoluzione spaziale o geometrica

È la dimensione della cella di superficie associata ad un pixel o nodi. Influisce sulla riproduzione dei dettagli della scena e dipende:

- dall'altezza del sistema di ripresa
- dalle dimensioni del rilevatore

Può variare da qualche metro fino a qualche km (5 km per Meteosat)

Per indicare la risoluzione spaziale associata ai pixel di un'immagine si usa il GIFOV (ground IFOV), cioè la proiezione a terra dell'area del rilevatore:

$$\text{GIFOV} = \frac{P_L \cdot H}{f}$$

P_L : dim. lineare del rilevatore

H : quota del rilevatore

f : lunghezza focale del sistema ottico

È legata al contrasto: Se ad esempio $\text{GIFOV} = 30 \text{ m}$ non è detto che in condizioni di forte contrasto non siano individuabili oggetti aventi dimensioni inferiori ai 30 m

Risoluzione radiometrica

Maggiore è il numero di valori discreti utilizzati per rappresentare l'ampiezza del segnale elettrico in uscita dal rilevatore, maggiore sarà la capacità di distinguere tra i diversi valori di radianza della scena $\Rightarrow$ > risoluz. radiometrica. Il numero L di possibili valori di intensità di livelli di grigio o numeri indice DN è data da:

Supporti e formati di registrazione dati

50

Il formato di registrazione indica l'organizzazione dei DN che formano le immagini.

I principali formati di registrazione dei dati immagine sono tre:

1. Bande sequenziali **BSQ** (Band Sequential): I DN di ogni banda si dispongono uno di seguito all'altro fino a completare tutti i pixel di una banda. Non è ogibile l'estrazione di sottoimmagini multispettrali. È il formato più diffuso nella distribuzione di dati satellitari.
2. Bande intrecciate per riga **BIL** (Band Interleaved by Line): I DN sono organizzati per riga: dopo i DN della riga **I** della banda 1 si incontrano i DN della riga **I** banda 2. Il file BIL facilita l'estrazione di immagini multispettrali.
3. Bande intrecciate per pixel **BIP** (Band Interleaved by Pixel): I DN seguono un'alternanza per pixel, così che dopo il pixel della linea 1 nella banda 1 segue il pixel della linea 1 della banda 2.

banda 1



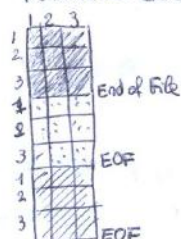
banda 2



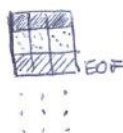
banda 3



FORMATO BSQ



FORMATO BIL



FORMATO BIP



Analisi statistica delle immagini

Si studia la distribuzione statistica dei DN dei pixel attraverso gli strumenti della statistica descrittiva quali vettore delle medie e le matrici di varianza-covarianza.

variabile casuale $X =$ variabile che assegna un unico valore numerico x_i ad ogni possibile uscita di un esperimento. Si dice discreta se può assumere solo un numero limitato di valori in un intervallo (es. lancio di un dado)

Elaborazione delle immagini

52)

Fotointerpretazione (analista uomo)

VS

Interpretazione automatica (PC)

- Processo di decisione ad alto livello
- Analisi multispettrale limitata
- Limitazione nella distinzione dei livelli di grigio (16) e colori
- Facilità d'uso dell'info spaziale
- Opera a piccola scala rispetto alla dimensione dei pixel
- Bassa accuratezza nel calcolo delle aree
- Soggettiva, concreta, qualitativa

- Processo di decisione a basso liv.
- reale analisi multispettrale
- Analisi quantitativa di tutti i pos livelli di grigi⁽²⁵⁶⁾ e colori
- Limiti nelle tecniche d'informazione spaziale
- Opera a livello del pixel
- Elevata accuratezza nel calcolo delle aree
- Oggettiva, astratta, quantitativa

Chiavi di lettura delle immagini

- Forma, data dal contorno geometrico (naturale o artificiale ?)
- Dimensione $\Rightarrow$ assegnazione di una scala sulla base della dimensione di oggetti noti
- Tono e colore
- Tessitura : descrive l'andamento delle variazioni spaziali di luminosità $\Rightarrow$ determina l'aspetto liscio o rugoso di un elemento
- Modello o struttura (Pattern) : disposizione spaziale delle forme degli oggetti
- Ombra
- Ubicazione

Inoltre per l'interpretazione visiva risulta estremamente importante disporre della terza dimensione e profondità della scena osservata
 $\Rightarrow$ riproduzione stereoscopica

È possibile inoltre operare sulla natura radiometrica dei dati rilevati

scala continua dei toni di grigio L ($0 \leq L \leq 255$) di un'immagine "monospetticale" viene suddivisa in un certo numero di intervalli, e i numeri indice DN corrispondenti ad ogni intervallo vengono raggruppati in un solo livello di grigio cui viene assegnato un nuovo numero indice DN' .



Questo processo si può estendere naturalmente ad un'immagine a colori.

Ognuna delle tecniche si realizza mediante l'uso di una tabella di trasformazione LUT (Look-Up-Table), un vettore di 256 elementi che accetta dei dati in ingresso e restituisce in uscita dei valori secondo una certa trasformazione. Le LUT sono inserite come dispositivi hardware tra le memorie grafiche e il convertitore A/D. In questo modo quando si vuole operare nella trasformazione dell'immagine basta modificare il valore corrispondente nella LUT.

Esempio

	0-36	37-72	73-108	109-144	145-180	181-216	217-255
	Nero	Blu	Ciano	Verde	Giallo	Rosso	Bianco
B	0	255	255	0	0	0	255
V	0	0	255	255	255	0	255
R	0	0	0	0	255	255	255

Matematicamente la convoluzione tra due funzioni di una variabile 56
 consiste nell'integrare il prodotto tra la prima e la seconda traslata
 di un certo valore: $(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \cdot g(t-\tau) \cdot d\tau$. L'integrale è un numero reale.

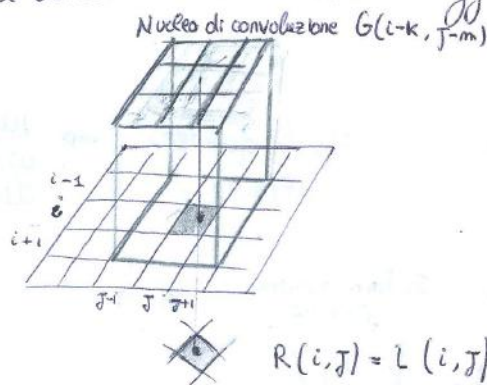
Poiché un'immagine L ha due variabili indipendenti che rappresentano
 le variabili di posizione del pixel e le variabili sono discrete

$$R(i, j) = L(i, j) \otimes G(i, j) = \sum_k \sum_m L(k, m) G(i-k, j-m)$$

Inoltre l'operazione è efficace solo in un particolare intorno del pixel
 di coordinate (i, j) dove $G \neq 0$. Questo intorno è detto nucleo di convoluzione (kernel)
 o nucleo del filtro che è una matrice (3×3 , 5×5 , 7×7 tipicamente)

I valori numerici che costituiscono la matrice hanno la funzione di pesi
 usati per trasformare il valore del pixel di coordinate (i, j) in funzione
 dei valori dei pixel circostanti.

Nelle operazioni di filtro spaziale è possibile scegliere tali coefficienti
 in funzione dell'obiettivo che si vuole raggiungere



L'operazione di convoluzione
 opera su un'immagine
 digitale attraverso la
 tecnica della finestra
 mobile

Filtro direzionale

58)

Mentre il filtro passa-alto è isotropo nelle diverse direzioni, in alcune applicazioni può essere utile mettere in evidenza le transizioni lungo certe direzioni.

Tale filtro produce valori zero nelle zone omogenee (a valore costante), valori bassi su zone a bassa frequenza ed estremizza quelle ad alta frequenza. Esempi di nuclei di convoluzione

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +1 & +1 \end{bmatrix}$$

orizzontale

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

verticale

$$\begin{bmatrix} 0 & +1 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

diagonale

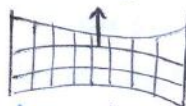
Evidenziano strutture lineari orizzontali, verticali e diagonali.

Volendo individuare i contorni in tutte le direzioni si ricorre alla funzione gradiente (filtro Roberts e filtro Sobel)

Filtro Nagao-Matsuyama

Si utilizza una finestra 5x5 centrata sul pixel (i,j) di cui intorno si considerano 8 diverse configurazioni di pixel e per ognuna si calcola la media e la varianza: il nuovo valore del pixel centrale è dato dalla media ottenuta dalla configurazione a varianza più bassa. Il filtro pertanto individua la regione localmente più omogenea, con varianza minore, e usa la sua media per la trasformazione.

- Distorsione panoramica $\Rightarrow$ errori di compressione di scale ogni 60°
estremi di ogni riga di scansione poiché l'FOV è costante
- $\rightarrow$ soluz = sovrapposizione sui bordi con più scansioni
- Curvatura superficie terrestre



VISTA DALL'ALTO DELL'IMMAGINE

Tecniche di ricampionamento radiometrico

es. contrazione dell'immagine

Applicando una trasformazione geometrica, la griglia dei centri dei pixel si trova in una nuova posizione, più accurata del p.to di vista geometrico, ma con valori radiometrici non più corrispondenti a quelli originali misurati dalla scena.

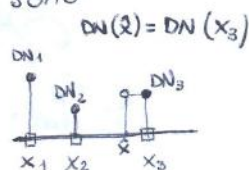
La stima del nuovo DN del pixel può essere fatta tramite:

- Ricampionamento del prossimo più vicino (Nearest Neighbour)
(o di ordine 0)

$\Rightarrow$ Si sceglie il valore del pixel che ha le coordinate intere riga-colonna (r,c) più vicine alle coordinate (x,y) ottenute dalla trasformazione geometrica

Pregio: non introduce nuovi valori di DN che quindi sono realmente osservati

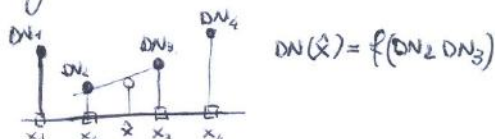
Può provocare un effetto "scalino" nelle immagini



- Ricampionamento bilineare

$\Rightarrow$ Il nuovo valore di DN è ottenuto dalla media pesata dei quattro pixel più vicini all'immagine originale

Produce un'immagine più sfocata



- Ricampionamento bicubico

$\Rightarrow$ Nel calcolo del nuovo DN, oltre a coinvolgere il valore dei quattro pixel più vicini si coinvolgono anche i dodici che li circondano. (16 in tutto)

$\Rightarrow$ 4 interpolazioni cubiche

Non va utilizzato nel caso di successive elaborazioni quantitative dell'immagine perché ne modifica fortemente i valori di DN. D'altro canto l'immagine avrà un aspetto visivo piuttosto gradevole che ben si presta all'interpretazione.

Nel caso di trasformazione RST sono necessari almeno 2 punti ^{co. Ter}

$$GCP_1 \rightarrow (\xi_1, \eta_1, X_1, Y_1)$$

$$GCP_2 \rightarrow (\xi_2, \eta_2, X_2, Y_2)$$

⋮

$$GCP_n \rightarrow (\xi_n, \eta_n, X_n, Y_n)$$

N.B: servono più punti di quelli minimi richiesti!
Per avere info ridondanti

$$\begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & 1 & 0 \\ Y_1 & -X_1 & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_n & Y_n & 1 & 0 \\ Y_n & -X_n & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \eta_1 \\ \vdots \\ \xi_n \\ \eta_n \end{pmatrix}$$

$$A \cdot X = L$$

$$X = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot L$$

La precisione di una georef. è valutata tramite RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n RMS_i^2}{n-1}} \quad \text{con } RMS_i = \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2} \quad \text{con } \Delta X = X_i - \hat{X} \\ \Delta Y = Y_i - \hat{Y}$$

(X_i, Y_i) coordinate collimate

$(\hat{X}, \hat{Y})$ coordinate stimate

Noti i parametri incogniti si applica la trasformazione a tutte le celle dell'immagine (operazione di warping)

Metodi di classificazione automatica

62)

Metodi convenzionali: si adotta la logica booleana di V o F, per cui ogni pixel appartiene o non appartiene ad una classe. Al pixel è associato una etichetta che indica la classe a cui esso è più "simile" secondo una determinata regola di decisione.

Metodi non convenzionali: si adotta la logica multivalore per cui è ammessa per i pixel la possibilità di appartenenza a più classi. (x dati di diversa natura)

Elementi fondamentali per la classificazione

Addestramento

Fornire informazioni sul problema per permettere al calcolatore di riconoscere gli elementi di una classe da quelli di un'altra

Assegnazione

In cui si assegna in modo automatico a tutti i pixel dell'immagine l'etichetta relativa ad una delle classi tematiche di interesse

Validazione

In cui viene verificata la capacità di generalizzazione attraverso l'analisi degli errori.

Classificazione guidata o supervised è l'approccio più utilizzato in TLR in cui si richiede di definire a priori le classi di informazione e riconosca un certo numero di pixel rappresentativi o prototipi, detti training

Algoritmi di classificazione

Minima distanza dalla media MDM

Utilizza solo il valore medio del pixel di training per ognuna delle classi: Per ogni pixel di vettore di misura x si calcola quindi la distanza dal valore medio μ_i di ogni classe w_i e il pixel viene assegnato alla classe per cui la distanza è minima. È sensibile al grado di dispersione delle classi, nello spazio e caratteristiche

L'algoritmo MDM non viene usato nelle applicazioni in cui le classi 64 sono vicine l'una all'altra e molto disperse.

• Algoritmo del parallelepipedo

Introduce una certa sensibilità di dispersione delle classi nello spazio multidimensionale, considerando dei limiti (es. valore max d'el. DN trovato nelle bande).
Una cella è assegnata ad una classe se, nello spazio delle bande, ricade all'interno del parallelepipedo di sua pertinenza.

• Massima verosimiglianza con il modello Gaussiano (Parametrica)

Ipotesi: ogni classe w_i , e il suo prototipo, è caratterizzato da una distribuzione di probabilità di tipo Gaussiana.

⇒ si assegna ogni pixel alla classe per cui la probabilità è maggiore.

Nel caso di uno spazio delle caratteristiche a una dimensione, la probabilità condizionale $P(x/w_i)$ per la classe w_i è pari a:

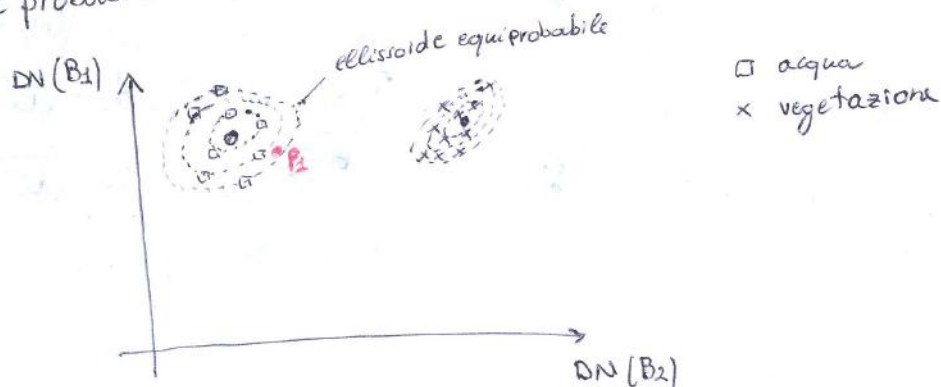
$$P(x/w_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \cdot e^{-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu_i)^2}{\sigma_i^2}}$$

μ_i : valore medio delle misure della classe w_i

σ_i^2 : varianza delle misure della classe w_i

Tiene conto della posizione x di un pixel rispetto ai valori medi delle classi e della dispersione della classe stessa.

Minimizza la probabilità di errori sull'insieme dei dati.



Tipicamente la matrice di errore è costruita usando la teoria classica degli insiemi, per cui l'etichetta associata ad un elemento (pixel) indica la completa appartenenza o non appartenenza ad una classe. Esistono tuttavia altre possibilità, come nelle logiche multivalore o multi-appartenenza (logica *fuzzy*), in cui il confronto può avvenire fra la mappa tematica e le classi di copertura primarie o secondarie.

Il generico elemento P_{ij} della matrice di errore rappresenta la probabilità per un certo pixel, scelto casualmente, di essere assegnato alla classe i nella mappa tematica e appartenere alla classe j nel riferimento. In una situazione ideale, tutti gli elementi della matrice che stanno al di fuori della diagonale principale dovrebbero essere nulli, indicando così che si è in una situazione di perfetto accordo e nessun pixel è stato erroneamente classificato o misclassificato.

I totali di riga (marginale di riga) rappresentano la proporzione di area che nella mappa tematica appartiene alla classe i , mentre i totali di colonna rappresentano la vera proporzione di area che appartiene alla classe j .

Come strumento di valutazione dell'accuratezza, la matrice di errore si rivela veramente efficace, poiché contiene non solo le informazioni sugli elementi correttamente classificati, ma anche sugli errori e come sono distribuiti fra le diverse classi. Si osservi l'esempio della matrice di errore a 4 classi nella tabella seguente.

E' possibile vedere come il numero totale di pixel classificati come pascoli (C4, totale 4^a riga: 149) coincida esattamente con il numero totale dei pixel della categoria pascoli dei dati di verità (V4, totale della colonna: 149), ma di questi 149 pixel solamente 116 (cella di riga-4 e colonna-4) coincidono, mentre gli altri 9, 6 e 18 che sono pure classificati come pascoli, sono rispettivamente di rocce, latifoglie e conifere.

	Dati di Riferimento				Tot Riga	LEGENDA DELLA MAPPA	
	V1	V2	V3	V4			
ati	C1	91	5	13	4	113	C1, V1 : Rocce
i	C2	11	65	12	14	102	C2, V2 : Latifoglie
sifica-	C3	7	0	110	15	132	C3, V3 : Conifere
one	C4	9	6	18	116	149	C4, V4 : Pascoli
Colonna		118	76	153	149	N=496	N = numero di campioni test

Esempio di matrice di errore in uno schema a 4 classi. Le righe rappresentano i dati della classificazione C1, ..., C4 e le colonne i dati del riferimento V1, ..., V4.

Misure di accuratezza

La matrice di errore viene usata come punto di partenza per la costruzione di una serie di misure di accuratezza. Noi ci focalizziamo su quei parametri della popolazione degli errori, che

Indica la probabilità condizionale che scelto a caso un pixel assegnato alla classe i nella mappa tematica, appartenga alla classe k nei dati di riferimento:

$$CE = 1 - AU = \frac{\sum_{k=1}^q P_{ik}}{P_{i+}} \text{ con } (k \neq i)$$

In statistica si parla di errori del 2° tipo, poiché si accetta come vero ciò che è falso.

5) **Errore di Omissione OE** (omission error) per la classe j , associato alla Accuratezza Produttore.

Indica la probabilità condizionale che scelto a caso un pixel appartenente alla classe j nei dati di riferimento, sia stato assegnato alla classe k nella mappa tematica:

$$OE = 1 - AP = \frac{\sum_{k=1}^q P_{kj}}{P_{+j}} \text{ con } (k \neq j)$$

Gli elementi sulle righe, fuori della diagonale, sono gli errori di commissione o inserimento, sono cioè pixel che per verità appartengono alle classi B e C, ma il classificatore erroneamente inserisce come membri della classe A. Analogamente gli elementi sulle colonne, fuori della diagonale, sono gli errori di omissione o esclusione, sono cioè pixel che appartengono per verità alla classe A, ma le vengono impropriamente sottratti non essendo riconosciuti tali dal classificatore che li assegna alle classi B e C.

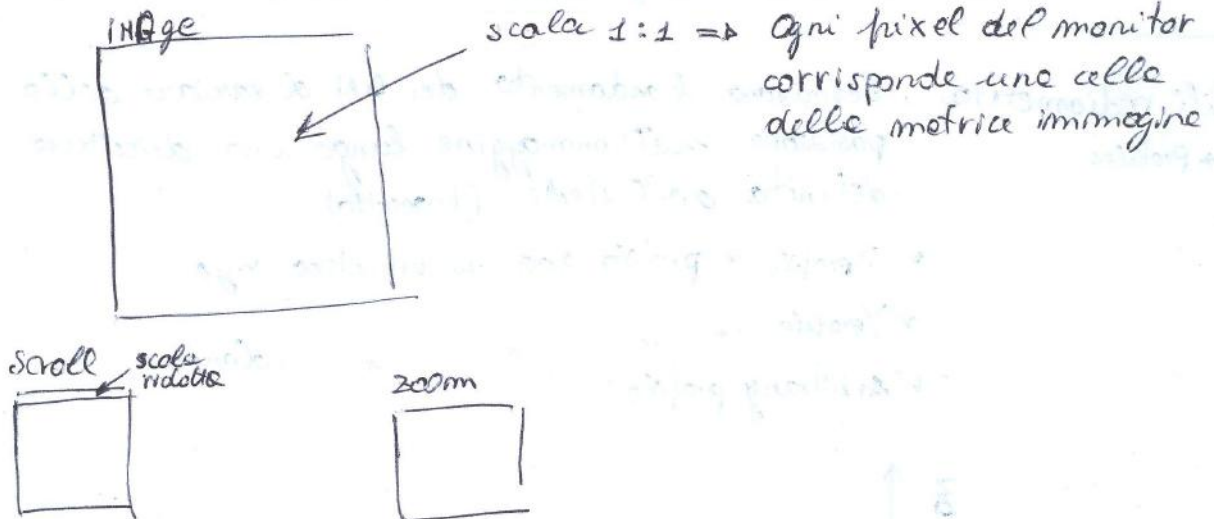
Si consideri l'esempio di calcolo dei parametri di accuratezza riportato nella tabella seguente. L'accuratezza globale AG della mappa tematica ottenuta dalla classificazione è 77.01 %. Si supponga di essere interessati a valutare la capacità del classificatore di individuare i boschi di latifoglie (V1, C1). L'accuratezza del produttore, cioè il rapporto fra il numero di pixel corretti per la classe latifoglie (65) e il numero totale di pixel di latifoglie nei dati di verità (76), è $AP = 85.5\%$, che è un valore sicuramente buono. L'accuratezza utente risulta invece minore ($AU=63.7\%$), un valore non certo soddisfacente. Infatti, benché l'85.5% delle aree a latifoglie sia stato riconosciuto dal classificatore, solo il 63.7% delle aree indicate come tali sulla mappa tematica sono realmente latifoglie. La matrice di errore rivela infatti la presenza di confusioni fra classi: molti pixel di conifere (12), pascoli (14) e rocce (11) sono stati inseriti erroneamente nella classe latifoglie (errori di commissione: 36.3%). In conclusione benché il produttore della mappa tematica possa affermare che nell'85% dei casi in cui un'area è di latifoglie, essa viene identificata come tale, l'utente di tale mappa troverà che solo il 63% delle volte che controllerà sul terreno un'area

1)

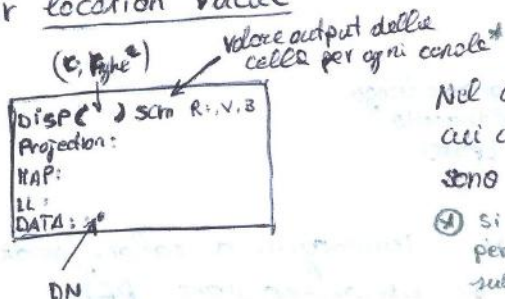
Riassunti ENVI - Parte pratica

Immagini salvate in ENVI come .img sono composte da due file

- quello "img"
- quello "hdr" (contiene n. righe, n. colonne, bande, tipo file...): 1kb



• Cursor location Value

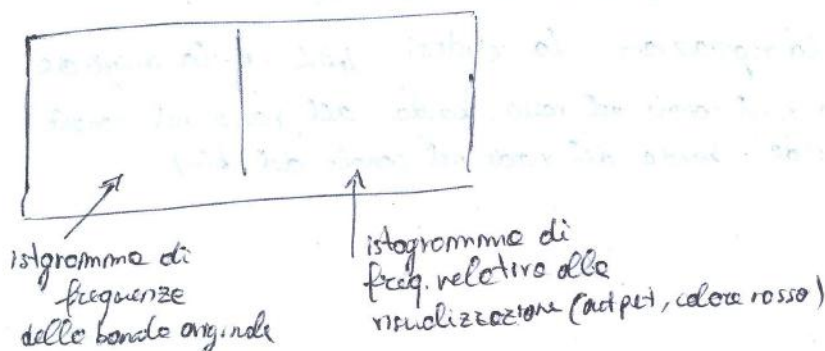


Nel campo data viene visualizzato il DN, le cui coordinate immagine (colonna, riga) sono riportate ()

④ si noti che i campi DATA e SCN sono generalmente diversi perché ENVI applica automaticamente uno stretch al 2% sulle code dell'istogramma per ottimizzare la visualizzazione.

• Interactive Stretching → permette di sfruttare tutto il range disponibile per la visualizzazione per le celle comprese nel range di valori, migliorandone il contrasto

Enhance → Interactive Stretching



Scatterognommi tools → 2D scatter Plots → selezione bande → ok

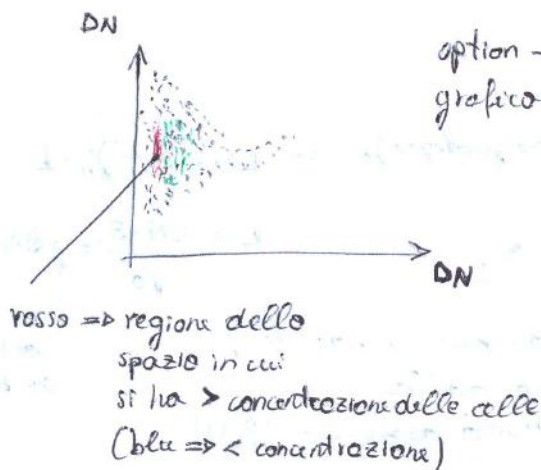
3)

Sono rappresentazioni nel piano delle bande selezionate (due) della distribuzione dei DN.

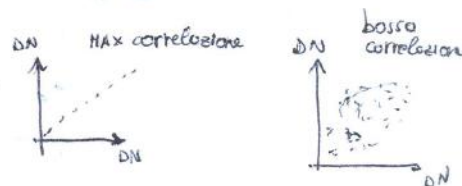
Ogni cella dell'immagine può essere pensata come un punto di questo spazio avendo i DN come coordinate.

Consentono:

- Verificare correlazione tra le bande



option → density slice restituisce il grafico a colori.



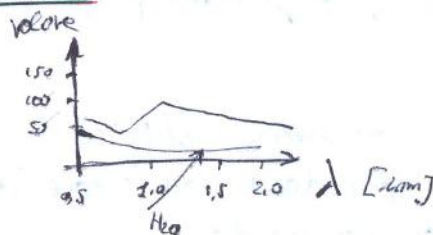
es. banda 1 e banda 5
→ scatterplot 2D → è corretto che non ci sia correlazione per l'acqua!

Firme spettrali: Descrive la radianza/riflettonza di una cella a varie delle bande (lunghezza d'onda)

Quando si sta lavorando con imm. multispettrali è possibile estrarre le firme spettrali delle celle:

1. selezione aree
2. tools → spectral Pixel editor → finestra nera da cui edit → extract current spectrum

permette di estrarre le prime firme spettrali medie di un intorno della cella



Georeferenziazione

Le operazioni che consentono di associare ad ogni cella della matrice immagine una coppia del s.r. scelto vengono indicate con il termine di georeferenziazione. $\Rightarrow$ operazioni di warping

La stima dei m.m.g. dei parametri della trasformazione avviene attraverso la collimazione di un suff. numero di punti di appoggio (Ground-Control Point - GCP)

Nel caso si desideri "appoggiare" l'immagine in un s.r. assoluto cartografico si utilizza "Image to map". (map $\rightarrow$ registration $\rightarrow$ select GCP: image to map)
Quelora sia suff. un controllo relativo tra due immagini utilizzando come s.r. il sistema di coordinate dell'immagine scelta si utilizza

"Image to image". Il numero di GCP da collimare è pari a $(1+n)^2$ con $n =$ grado del polinomio utilizzato

Image to Map Registration

Projection
UTM
Datum
WGS 84
Zone 32
OK



Ground control point

show list
RMS error

serve per l'inserimento delle coordinate dei punti omologhi, ovvero dei punti rappresentati le medesime entità sia sull'imm. da georeferenziare sia sulla cartografia

Premendo show list compare la tabella contenente le coordinate della base image e dello Warp Image, le coordinate della Warp image calcolate attraverso i parametri stimati attraverso i punti collimati, i residui x e y espressi in celle (Predict x - Warp x ; Predict y - Warp y) e

L'ERRORE QUADRATICO MEDIO RMS (Round Mean Square) $= \sqrt{\text{err}_x^2 + \text{err}_y^2}$

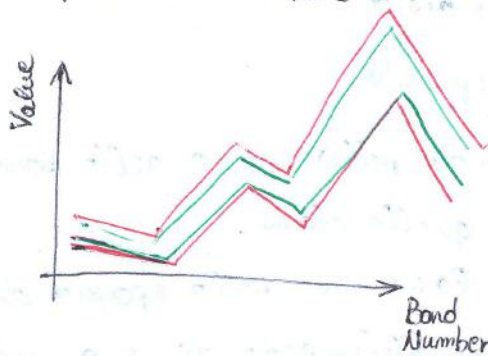
L'errore globale commesso nella collimazione di tutti i punti viene misurato attraverso il RHSE (Round Mean Square Error) riportato nella finestra di Ground Control point

7)
Nel caso di classificatori spettrali la grandezza statistica considerata è la variabile multidimensionale (dimensioni pari al n. di bande dell'immagine) costituita dal vettore Firma spettrale $\bar{F}$

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} DN_1 \\ DN_2 \\ \vdots \\ DN_n \end{bmatrix}$$

Tools → Region of Interest → Roi Tool

Per verificare la rappresentatività del campione si utilizza il pulsante STATS della finestra Roi Tool



- linea spezzata bianca: $\bar{x}$ la congiungente di tutti i valori medi della Roi considerata
- linee spezzate verdi: congiungono i valori media $\pm$ dev standard
- linee spezzate rosse: congiungono i valori max e min per la banda della Roi

NB: se le linee rosse si discostano dalle altre due $\Rightarrow$ sono presenti celle di oltre classi (outliers) che inquinano il campione

Classificatore supervisionato MINIMA DISTANZA

È un algoritmo basato sul calcolo delle distanze euclinee, nello spazio n-dimensionale delle bande, tra il vettore P che rappresenta la singola cella in tale spazio e i centroidi (C_i), quindi rappresentativi delle diverse classi, la cui posizione nello spazio viene definita come il vettore medio delle singole Roi

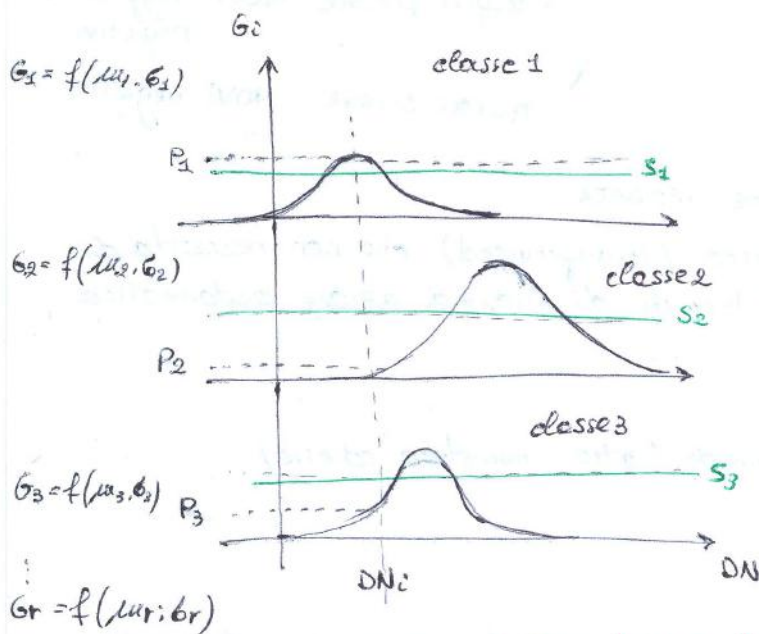
$$P = \begin{bmatrix} DN_1 \\ DN_2 \\ \vdots \\ DN_n \end{bmatrix}$$

$$C_i = \text{media}(Roi) \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \vdots \\ \bar{x}_n \end{bmatrix}$$

Classificatore supervisionato Maximum Likelihood (massima verosimiglianza) 9)

Il processo di classificazione avviene in questo caso secondo criteri probabilistici e non geometrici

Ipotizzando per ogni classe (quindi per ogni ROI) rappresentativa una distribuzione normale multivariata (gaussiana n-dimensionale, con n = numero di bande) si calcolano μ e σ^2 per ogni classe rappresentata dalla ROI



La classe di assegnazione risulta quella cui compete la probabilità più elevata

classification → supervised → maximum likelihood

Verifica della bontà delle classificazioni

Si valuta come le celle assegnate in fase di addestramento alle ROI siano poi classificate nella fase di applicazione del modello addestrato. Lo strumento utilizzato per la verifica è la MATRICE D'ERRORE o CONFUSION MATRIX. Essa è costituita incrociando le classi di associazione (righe) con le ROI (colonne)

Classification → post classification → Confusion matrix → Using Ground Truth ROI's

dati di classificazione	classi	dati di riferimento (verità)				TOTALI PER CLASSE NELLA MAPPA
		1	2	...	q	
1	1	P_{11}	P_{12}	...	P_{1q}	
2	2	P_{21}	P_{22}	...	P_{2q}	
...	...	...	...	...	...	
q	q	P_{q1}	P_{q2}	...	P_{qq}	
TOTALI PER CLASSE NEL RIFERIMENTO						

Sulla diagonale ci sono i casi di corretta classificazione, cioè accordo tra classificazione e verità. Gli elementi fuori della diagonale sono gli errori di classificazione