

IL TELERILEVAMENTO NELLA GESTIONE DELL'AMBIENTE TROPICALE

1. INTRODUZIONE

Una corretta gestione del territorio si basa su di una conoscenza approfondita ed aggiornata delle risorse disponibili, della loro distribuzione spaziale e dei processi in atto, sia nell'ambiente naturale che in quello antropizzato.

Nelle aree tropicali, a causa delle difficoltà logistiche e della carenza di studi anche a piccola scala, nonché dei rapidi mutamenti che vi si stanno verificando, l'acquisizione di dati ambientali non può che passare attraverso le tecniche di rilevamento a distanza, almeno per quanto riguarda indagini preliminari, aggiornamento dei dati e monitoraggio di processi rapidi.

Il telerilevamento ha avuto negli ultimi anni un rapido sviluppo con la messa a punto di nuovi sensori che permettono lo studio della superficie terrestre in tutta quella parte dello spettro elettromagnetico che va dall'ultravioletto alle microonde. Questi sensori possono essere installati su varie piattaforme, aerei, palloni, satelliti, in modo da poter variare la risoluzione delle immagini e la periodicità delle riprese.

L'utilizzazione di immagini riprese da aereo è spesso inconciliabile con le necessità di molti paesi sia per quanto riguarda i costi dei voli che per i tempi, anche burocratici, necessari per la loro realizzazione. In particolar modo questi ultimi sono estremamente ridotti per l'acquisizione delle immagini rilevate dai satelliti che è possibile ottenere, senza bisogno di alcuna autorizzazione da parte dei governi locali, dai centri di diffusione dei dati (Telespazio, Eosat, Spot Image, ecc.).

Ma uno degli aspetti negativi, che ancor oggi pongono limiti all'utilizzazione di una parte dei dati telerilevati, in particolar modo nei paesi in via di sviluppo in cui queste metodologie troverebbero le aree preferenziali di applicazione, è costituito dai costi di acquisizione e di elaborazione dei dati, tanto che si ritiene che solamente quelli rilevati da satellite nel visibile, nell'infrarosso vicino e termico siano realmente utilizzabili con continuità e con rapporto costi/benefici vantaggioso. Ciò non vuole certamente dire che altri tipi d'immagine non siano applicabili con profitto, ma la loro utilizzazione è per il momento limitata a progetti pilota, in aree ristrette e comunque, data l'occasionalità della cosa, gestiti direttamente dai paesi, così detti, sviluppati.

Quanto diremo nelle prossime pagine si riferirà quindi prevalentemente a quei dati la cui gestione può essere fatta direttamente dagli utilizzatori e in particolare faremo riferimenti a quelli prodotti dai satelliti Landsat, SPOT (Satellite Probatoire pour l'Observa-

tion de la Terre), NOAA (National Oceans and Atmospheric Administration), e Meteosat.

Un'attenzione particolare verrà posta, non solo ai principi fisici che stanno alla base del telerilevamento, ma anche all'elaborazione digitale delle immagini poiché è proprio questa possibilità che fa del telerilevamento uno strumento estremamente versatile.

2. LE BASI FISICHE DEL TELERILEVAMENTO

La possibilità di studiare una superficie a distanza è legata all'informazione che la luce, emessa o riflessa da essa, trasporta.

L'esperienza quotidiana ci insegna che un corpo caldo emette dell'energia sotto forma di onde elettromagnetiche; la quantità di energia emessa per unità di superficie è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura assoluta:

$$W = \sigma T^4 \quad (\text{Legge di Stefan-Boltzmann})$$

dove $W =$ energia emessa, Wm^{-2}
 $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ }^\circ\text{K}^{-4}$
 $T =$ temperatura assoluta, $^\circ\text{K}$

In realtà solo un teorico "corpo nero" si comporta secondo questa legge, mentre la quantità di energia emessa dai corpi "reali" è sempre, anche se di poco, inferiore.

Il rapporto fra l'energia emessa da un corpo e quella emessa da un "corpo nero" di uguale temperatura prende il nome di emissività ed ha valori compresi fra 1 (corpo nero) e 0 (teorico "corpo bianco") anche se gli oggetti con cui abbiamo normalmente a che fare hanno una emissività compresa fra 0.99 e 0.90 (tab. 1).

Tab. 1 - Emissività dei corpi e temperatura radiante a 300°K di temperatura cinetica (da LILLESAND & KIEFER, 1979)

Oggetto	Emissività	Temperatura radiante
Corpo nero	1.00	300 °K (27.0°C)
Vegetazione	0.98	298.5°K (25.5°C)
Suolo umido	0.96	297.0°K (24.0°C)
Suolo asciutto	0.92	293.8°K (20.8°C)

Anche se la differenza di emissività fra i corpi è assai modesta può capitare che l'energia emessa da una superficie sia maggiore di quella emessa da un'altra anche se la temperatura della prima è inferiore.

Sappiamo inoltre che alla temperatura di un corpo è anche legato il suo colore, ossia che vi è una legge che lega la temperatura alla lunghezza d'onda alla quale

(*) Istituto Agronomico per l'Oltremare - Ministero Affari Esteri, Firenze.

(**) Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Firenze.

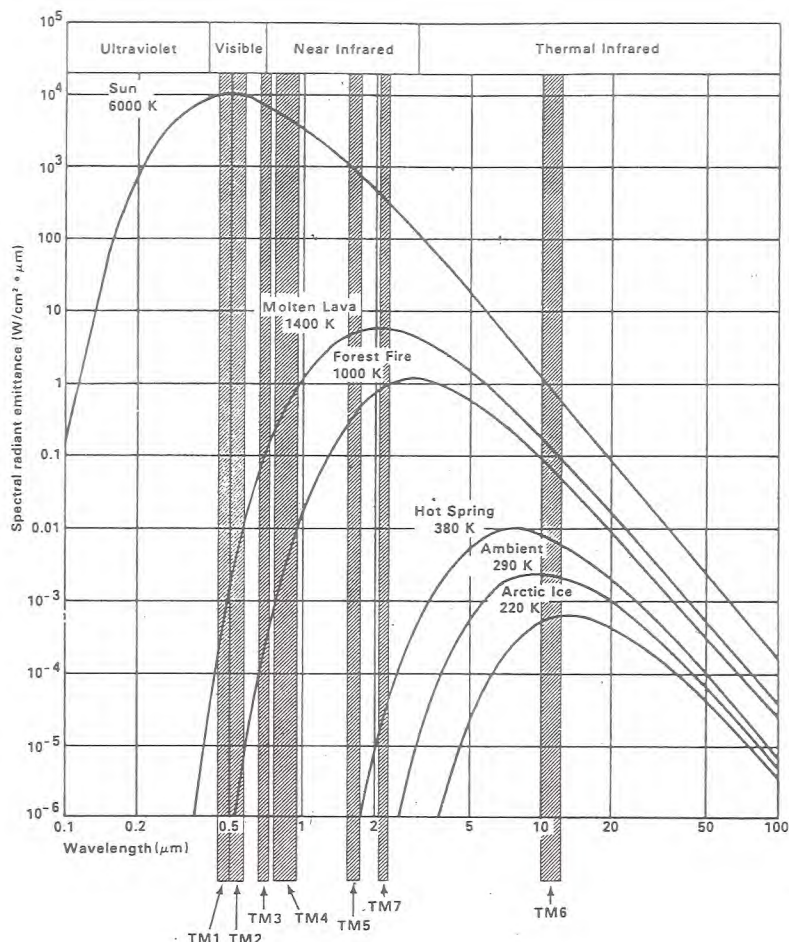


Fig. 1 - Distribuzione spettrale dell'energia irradiata da un corpo nero a differenti temperature. Sono anche indicati gli intervalli relativi alle bande del sensore Thematic Mapper (da SADOWSKI & COVINGTON, 1987).

viene emessa la massima quantità di energia (fig. 1):

$$\lambda_m = A/T \quad (\text{Legge di Wien})$$

dove λ_m = „lunghezza d'onda alla quale viene emesso il massimo picco di energia, μ

$$A = 2898 \mu^\circ K$$

$$T = \text{temperatura, } ^\circ K.$$

Per fare un esempio consideriamo la temperatura del Sole alla fotosfera che è di circa 6.000°K; secondo la Legge di Wien la massima energia verrà emessa ad una lunghezza d'onda pari a: $2.898/6.000 = 0.48 \mu$, ossia nel visibile. Non è certamente un caso che gli occhi degli esseri viventi e i fotorecettori delle piante si siano evoluti per raccogliere luce proprio dove questa è più forte!

La luce che raggiunge un corpo può subire una differente sorte: può essere assorbita completamente, può essere riflessa completamente, o, come generalmente avviene, essere in parte assorbita e in parte riflessa. Le capacità che una superficie ha di riflettere la luce non sono però uguali per tutte le lunghezze d'onda (fig. 2), e ciò lo sperimentiamo tutti i giorni vedendo le foglie degli alberi verdi e l'acqua del mare blu.

La parte visibile dello spettro elettromagnetico è costituita dai colori blu (0.4-0.5 μ), verde (0.5-0.6 μ) e rosso (0.6-0.7 μ) che fondendosi insieme ci danno la visione del bianco. Se una superficie assorbe tutte le lunghezze d'onda che vanno da 0.4 a 0.6 μ e riflette quelle da 0.6 a 0.7 μ ci appare rossa; se avviene il contrario quella superficie ci apparirà ciano (blu + verde).

Le infinite sfumature dei colori degli oggetti che ci circondano sono appunto dovute alla loro diversa riflettività alle diverse lunghezze d'onda.

Si dice allora che una superficie ha una riflettività pari a:

$$R(\lambda) = E_r(\lambda)/E_i(\lambda)$$

dove $R(\lambda)$ = riflettività per una determinata lunghezza d'onda

$E_r(\lambda)$ = energia riflessa in quella lunghezza d'onda

$E_i(\lambda)$ = energia incidente in quella lunghezza d'onda.

Gli oggetti hanno riflettività comprese fra 0 (corpo nero) ed 1 (specchio teorico).

L'insieme dei valori di riflettività a varie lunghezze d'onda prende il nome di "firma spettrale" di una superficie e, se il numero di lunghezze d'onda è piuttosto elevato, diventa una caratteristica specifica che permette di riconoscere questa superficie solo attraverso l'analisi della luce che riflette. Su questo principio si basa tutto il telerilevamento che opera nel campo del visibile e dell'infrarosso vicino.

Purtroppo uno dei problemi di cui si deve sempre tener conto nell'acquisizione di dati da satellite è il fatto che l'energia in arrivo sulla superficie terrestre, e successivamente al sensore installato a bordo, non è sempre uguale dato che parte della radiazione solare viene assorbita o diffusa (in percentuali diverse da momento a momento e da lunghezza d'onda a lunghezza d'onda) dai gas e dalle particelle che costituiscono l'atmo-

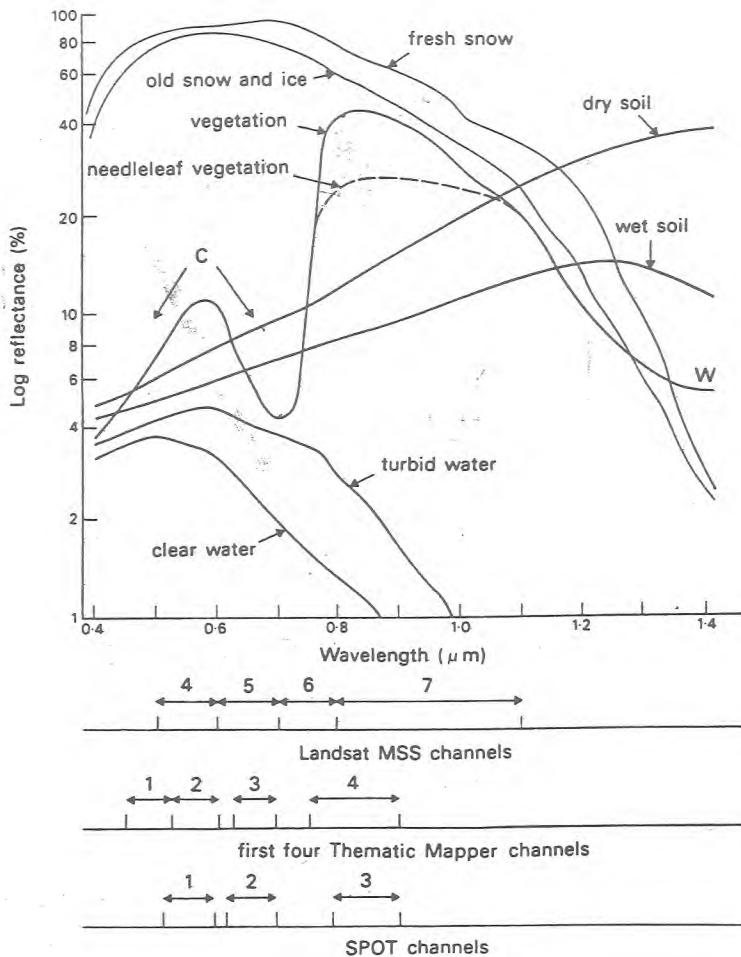


Fig. 2 - Riflettività di alcune superfici a determinate lunghezze d'onda (da HARDY, 1981).

sfera. Quest'ultime interferiscono maggiormente con le onde a lunghezza minore, tanto che una buona parte della componente blu della luce solare non raggiunge i nostri occhi direttamente ma attraverso numerose riflessioni nell'atmosfera, cosa che rende il cielo blu e il sole arancione.

Ciò pone fra l'altro un limite all'utilizzazione di sensori che operano a lunghezze d'onda minori. In realtà le cose sono ancora più complesse poiché la trasparenza dell'atmosfera è assai minore di quella che possiamo constatare con i nostri occhi: la luce del Sole ci arriva solo attraverso strette finestre, una delle quali appunto nel visibile, entro le quali è possibile operare. I maggiori responsabili dell'assorbimento della luce solare sono l'anidride carbonica e l'acqua che rendono l'atmosfera opaca a determinate lunghezze d'onda (fig. 3).

3. I SENSORI

I sensori ospitati dai satelliti di cui ci occuperemo appartengono tutti al gruppo degli scanner ottici. Si tratta di strumenti in cui uno specchio oscillante permette di raccogliere la luce riflessa o emessa da diverse parti della scena ai due lati della proiezione a terra dell'orbita percorsa dal satellite. La luce riflessa dallo specchio raggiunge un sistema ottico che la concentra su dei sensori che convertono il segnale ottico in uno elettrico di intensità proporzionale alla quantità di ener-

gia radiante in arrivo. La luce in arrivo può essere anche fatta passare attraverso un prisma che la divide nei vari colori che attivano sensori separati (Scanner multispettrale) (fig. 4). Ecco che l'energia riflessa da una superficie nelle diverse lunghezze d'onda può essere raccolta separatamente a bordo di un satellite; questa potrà successivamente essere messa a confronto con varie "firme spettrali" note e consentirci di giungere ad un riconoscimento automatico delle superfici.

Il segnale continuo prodotto dai sensori viene campionato ad intervalli regolari ed i numeri così ottenuti vengono ordinati secondo una matrice in cui il valore del numero indica la riflettività alla lunghezza d'onda considerata, e la posizione l'area che veniva osservata dallo specchio in quel momento.

Ciascun numero indica quindi la riflettività di un elemento discreto di superficie le cui dimensioni saranno inversamente proporzionali alla risoluzione geometrica del sensore. Nell'immagine che si otterrà dopo vari processi di elaborazione a ciascun numero verrà associato un determinato livello di grigio che colorerà tutto il quadratino che sull'immagine corrisponde alla superficie osservata in un determinato istante dallo specchio. Questo elemento dell'immagine (pixel = picture element) potrà venire rappresentato di dimensioni diverse, ma il suo ingrandimento non porterà certo ad un aumento dell'informazione ottenuta, ma anzi l'interpretazione di una scena con pixel troppo grandi sarà sempre più difficile. Non ha quindi senso, in teoria, parlare di scala di un'immagine rilevata in modo digi-

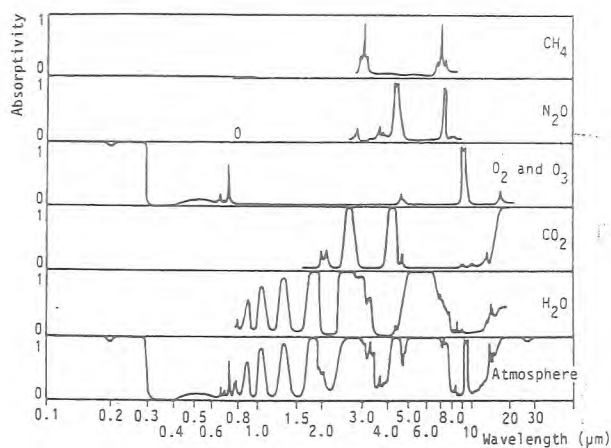


Fig. 3 - Spettri di assorbimento dei singoli costituenti e dell'atmosfera nel suo insieme (da MULDER, 1987).

tale, anche se nel linguaggio corrente diventa spesso una necessità.

Dato che la velocità del satellite è assai elevata, un sistema a scansione non può osservare le strisce di superficie terrestre che gli si presentano via via al di sotto se non con una bassa risoluzione. A ciò si ovvia ponendo una serie di sensori a schiera - 6 nell'MSS (Multispectral Scanner) e 16 nel TM (Thematic Mapper) - che registrano il segnale proveniente contemporaneamente da più strisce (linee di scansione). Talvolta l'imperfetta taratura di uno di questi sensori è visibile nell'immagine per la presenza, ogni 6 - 16 linee, di una più chiara o più scura (striping).

Le dimensioni a terra del pixel (instant field of view, IFOV) variano nei diversi sensori: in quelli montati sui satelliti meteorologici con applicazioni anche in campo oceanografico e, come vedremo, utili anche per lo studio delle risorse terrestri l'IFOV è di circa un chilometro, mentre per quelli progettati esplicitamente per lo studio delle risorse terrestri si passa dai 79 metri del sensore MSS ai 10 metri del sensore pancromatico installato sul satellite francese SPOT.

I satelliti Landsat 4 e 5 ospitano, oltre all'MSS, il sensore TM con 6 bande di osservazione nel visibile e nell'infrarosso riflesso (figg. 5a e 5b) ed una nell'infrarosso termico; mentre per le prime la risoluzione a terra è di 30 metri, per quest'ultima è pari a 120 metri.

Lo SPOT, oltre alla banda pancromatica (fig. 6), ha tre bande nel visibile-infrarosso vicino con risoluzione pari a 20 metri.

Il sensore di questo satellite può inoltre essere ruotato per osservare la stessa zona da orbite diverse, cosa che fra l'altro permette la visione stereoscopica con grandi possibilità in campo cartografico e per l'analisi geologica e geomorfologica.

CARATTERISTICHE DEI SATELLITI LANDSAT

Orbita: quasi polare, eliosincrona.

Quota: 705 Km.

Ciclo di ripetizione: 16 giorni.

Sensori:

— *Multispectral scanner (MSS)*.

Risoluzione (IFOV): 79 metri.

Dimensioni della scena: 185x185 Km.

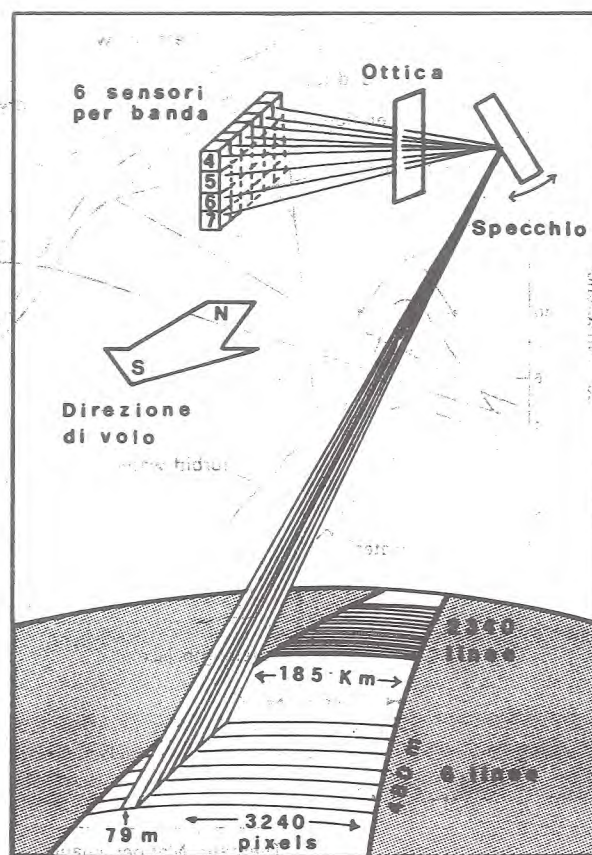


Fig. 4 - Sistema di scansione del Multispectral Scanner (MSS) installato sui satelliti Landsat.

Bande n°	Lunghezza d'onda (μ)	Colore
1	0.50 - 0.60	verde
2	0.60 - 0.70	rosso
3	0.70 - 0.80	rosso/IR vicino
4	0.80 - 1.10	infrarosso vicino

Nei satelliti Landsat 1, 2 e 3 le bande dell'MSS erano numerate da 4 a 7 poiché i numeri 1, 2 e 3 erano destinati alle bande del Return Beam Vidicon (RBV), sensore simile ad una telecamera successivamente abbandonato.

— *Thematic Mapper (TM)*

Dimensioni della scena: 185x185 Km.

Bande n°	Lunghezza d'onda (μ)	Colore	Risoluzione
1	0.45 - 0.52	(blu-verde)	30 m
2	0.52 - 0.60	(verde)	30 m
3	0.63 - 0.69	(rosso)	30 m
4	0.76 - 0.90	(IR vicino)	30 m
5	1.55 - 1.75	(IR medio)	30 m
6	10.40 - 12.50	(IR termico)	120 m
7	2.08 - 2.35	(IR medio)	30 m

CARATTERISTICHE DEL SATELLITE SPOT

Orbita: quasi polare, eliosincrona.

Quota: 832 Km.

Ciclo di ripetizione: 26 giorni (nadirale).

Sensori:

— 2 HRV (*High Resolution Visibile*) accoppiati.

Dimensioni della scena: 60x60 Km (nadirale).



Fig. 5 - Immagine Landsat TM, Banda 3 (a sinistra) e Banda 4 (a destra) dell'area di Kebili-Mansoura (Tunisia meridionale); 11 dicembre 1987. Lo Chott Djerid, vasta depressione salina, appare di colore grigio scuro sul lato occidentale dell'area. Nella fascia limitrofa allo Chott sono evidenti le oasi, in grigio scuro nell'immagine della Banda 3 per il forte assorbimento della vegetazione nel rosso, e chiare in quella della Banda 4 per l'alta riflettività nell'infrarosso. Le zone umide circostanti le oasi, ma non coltivate, appaiono, in entrambe le bande, con una tonalità più scura per la bassa riflettività dell'acqua. Le aree con copertura sabbiosa sono evidenziate da tonalità di grigio chiare. Le aree nere corrispondono agli specchi d'acqua occasionali. Nella parte alta dell'immagine si vedono le cuestas del Djebel Tebaga.

Bande:	Lunghezza d'onda(μ)	Colore	Risoluzione
1	0.50 - 0.59	(verde)	20 m
2	0.61 - 0.68	(rosso)	20 m
3	0.79 - 0.89	(IR vicino)	20 m
Pancrom.	0.51 - 0.73	(visibile)	10 m

CARATTERISTICHE DEI SATELLITI NOAA

Orbita: quasi polare, eliosincrona.

Quota: 833-870 Km.

Ciclo di ripetizione: 12 ore.

Due satelliti in orbita.

Sensori:

— *Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)*.

Risoluzione: 1.1 Km.

Dimensioni della scena: 2.400x2.400 Km.

Bande n°	Lunghezza d'onda (μ)	Campi di utilizzazione
1	0.58 - 0.68	Previsioni meteorologiche, osservazione di neve e ghiaccio.
2	0.725 - 1.10	Localizzazione di corpi idrici, fusione del ghiaccio e della neve, vegetazione.
3	3.55 - 3.93	Temperatura del mare, attività vulcanica, incendi.
4	10.30 - 11.30	Temperatura del mare, nuvole, umidità del suolo.
5	11.50 - 12.50	Temperatura del mare, nuvole, umidità del suolo.

— *High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS/2)*;

20 bande.

— *Stratospheric Sounding Unit (SSU)*;

3 bande.

— *Microwave Sounding Unit (MSU)*

4 bande.

Questi sensori hanno applicazioni esclusivamente nel campo della meteorologia e della fisica dell'atmosfera.

CARATTERISTICHE DEI SATELLITI METEOSAT

Orbita: geostazionaria.

Quota: 35.800 Km.

Sensore:

— *Visible Infrared Spin Scan Radiometer (VISSR)*.

Superficie ripresa: un intero emisfero.

Bande n°	Lunghezza d'onda (μ)	Risoluzione al nadir
1	0.4 - 1.1 (visibile/IR vicino)	2.5 Km
2	5.7 - 7.1 (IR termico)	5.0 Km
3	10.5 - 12.5 (IR termico)	10.5 -12.5 Km

L'ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI

I dati raccolti dal sensore vengono inviati a terra e archiviati su nastri magnetici. E' solo la loro successiva elaborazione che ci permette di ottenere delle immagini analogiche sulle quali fare le nostre osservazioni. Alcune elaborazioni, ivi comprese le correzioni radiometriche e geometriche, vengono generalmente eseguite

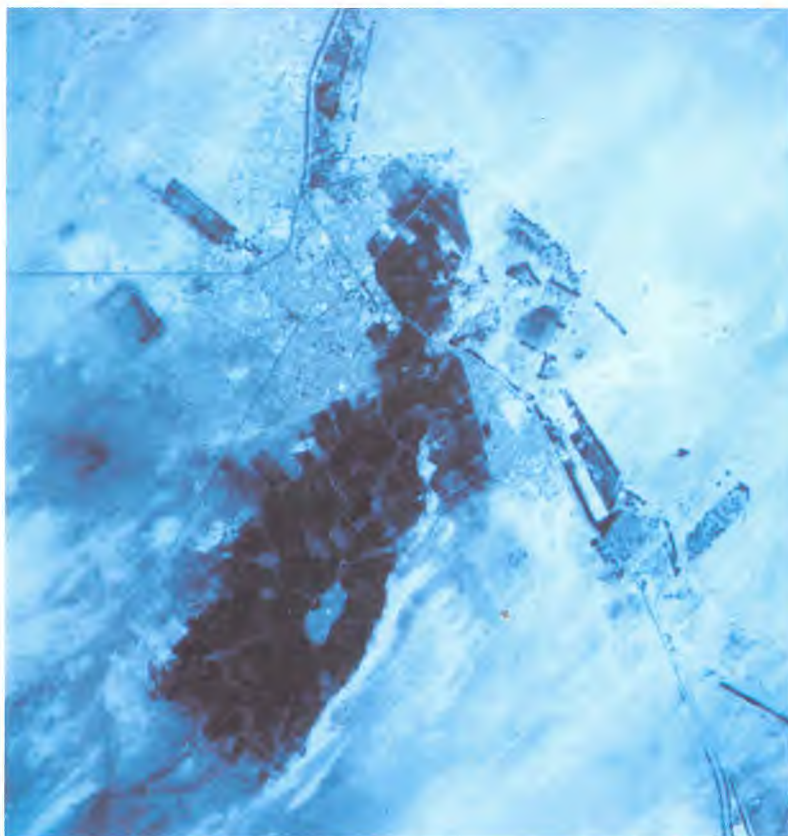


Fig. 6 - Immagine SPOT Pancromatica dell'Oasi di Kebili ripresa il 7 Maggio 1987.

nei centri di diffusione dei dati, come pure la trasformazione delle immagini digitali in immagini analogiche secondo procedure standard.

La quantità d'informazione contenuta nei dati originali è talmente elevata che è impossibile che un'immagine la rappresenti tutta e quindi ogni trasformazione analogico-digitale implica una perdita dell'informazione. Le elaborazioni standard eseguite nei Centri di diffusione dei dati raramente soddisfano le specifiche necessità dei vari utilizzatori ed è quindi indispensabile che ciascuno di essi parta dai dati archiviati sul nastro per produrre le immagini nella forma migliore per i suoi scopi.

Gli utilizzatori devono quindi avere un minimo di preparazione per quanto riguarda l'elaborazione delle immagini digitali tanto più che esistono oggi in commercio dei programmi e dei sistemi dedicati, estremamente potenti ed altrettanto semplici da usare, proprio per l'elaborazione delle immagini prodotte dai satelliti (ERDAS, GEMSYS, EBBA, DRAGON, I²S ecc.).

Come già accennato in precedenza, i dati rilevati dal satellite si organizzano su di una matrice, i valori presenti in ogni elemento della matrice (generalmente compresi fra 0 e 255, 2⁸ numeri) corrispondono al livello di riflettività, o emissività, di un pixel e, nell'immagine prodotta, verranno rappresentati con un ben determinato livello di grigio (0 = nero; 128 = grigio medio; 255 = bianco).

Ma poiché il sensore rileva più immagini contemporaneamente in corrispondenza dei vari colori, avremo tante matrici quante sono le bande di rilevazione del satellite.

Il fatto di disporre di immagini digitali facilita notevolmente la loro elaborazione, non solo per la produzione di immagini in cui certi elementi siano più fa-

cilmente interpretabili, ma essenzialmente nel confronto automatico fra le immagini relative alle diverse bande e nell'analisi statistica dei dati.

Una delle prime elaborazioni che vengono fatte su di un'immagine consiste nella costruzione ed interpretazione dell'istogramma di frequenza dei vari valori. Questo ci può fornire informazioni sul numero di elementi con riflettività diversa presenti in una scena e consigliare le successive elaborazioni.

Dato che l'occhio umano è capace di percepire non più di una ventina di livelli di grigio, è opportuno elaborare le immagini in modo tale da sfruttare al massimo questa capacità.

In molte immagini i valori dei pixel non si distribuiscono fra 0 e 255 e l'informazione è compressa fra un numero più limitato di valori; ciò fa sì che elementi della zona studiata, con riflettività non molto diversa, vengono ad avere un livello di grigio simile sull'immagine tanto che il nostro occhio non è in grado di separarli. Tirando l'istogramma (stretching) in modo tale che il valore minimo venga portato a 0 e il massimo a 255 è probabile che il livello di grigio dei due elementi venga differenziato meglio (figg. 7 e 8).

In altri casi l'informazione che andiamo cercando è compressa in un limitato numero di livelli di grigio anche se nella scena compaiono tutti e 256 (ciò comunque avviene solo raramente poiché i sensori sono tarati in modo da rispondere a condizioni estremamente diverse di luminosità). Si può in questi casi escludere la parte d'informazione che non ci interessa e tirare fra 0 e 255 solo quella parte dell'istogramma nella quale si trovano i dati di nostro interesse.

Un'altra elaborazione classica consiste nell'attribuire un determinato livello di grigio, o un determinato colore, ai pixels il cui valore numerico ricade in un

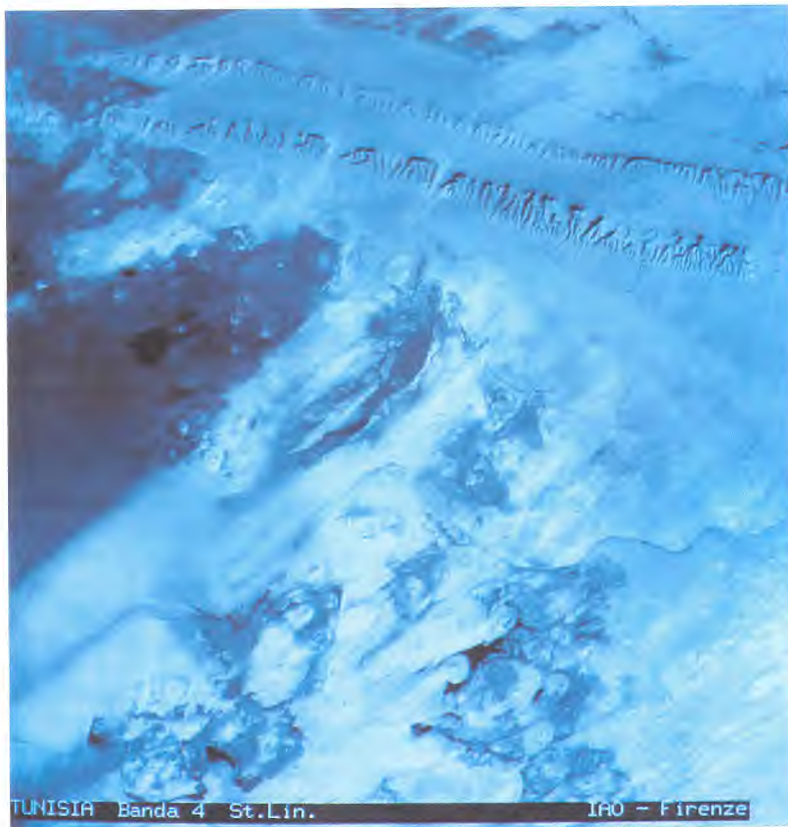


Fig. 7 - Stretch lineare dell'immagine rilevata in Banda 4 (cfr. con l'immagine di destra della figura 5).

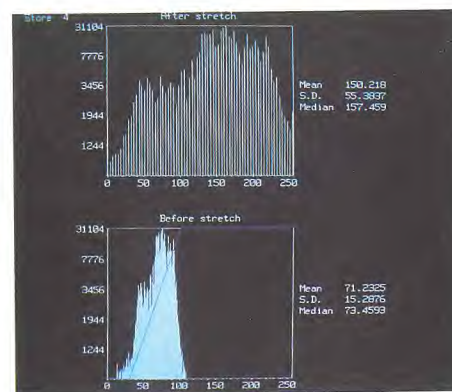


Fig. 8 - Istogramma di frequenza dell'immagine originaria (in basso) e di quella oggetto di stretch lineare (in alto).

certo intervallo (slicing). La scelta degli intervalli può essere fatta in base alla forma dell'istogramma o in base ad altri elementi a scelta dell'operatore.

Lo "slicing" produce quindi una classificazione molto semplice dell'immagine raggruppando i livelli di grigio in classi con valori digitali simili. Come vedremo in seguito esistono altri tipi di classificazione molto più sofisticati ed attendibili che utilizzano contemporaneamente più bande.

Si accennerà infine ad un'altra elaborazione elementare, l'equalizzazione, in cui ogni livello di grigio va ad interessare un ugual numero di pixels della scena. Ciò comporta che le varie classi vengano scelte di ampiezza inversamente proporzionale alla frequenza dei punti in quella parte dell'istogramma. Ciò fa sì che non vengano attribuiti molti livelli di grigio a quelle parti dell'istogramma in cui l'informazione è minore (figg. 9 e 10).

L'osservazione delle singole bande è certamente utile in molte applicazioni del telerilevamento, ma è nell'osservazione contemporanea di più bande che si riesce spesso ad estrarre da un'immagine una grande quantità di informazioni.

Questa possibilità si ottiene riproducendo tre bande contemporaneamente (colour composit), ciascuna in uno dei tre colori fondamentali (blu-verde-rosso). Dove si hanno alti livelli di grigio in tutte e tre le bande il colore risultante sarà il bianco (sintesi additiva), viceversa dove il valore è basso, si otterrà il nero (tav. I, figg. a e b).

Ma è nella combinazione dei vari livelli intermedi che si ottengono tutte le sfumature di colore che rendono facilmente interpretabile l'immagine; infatti, mentre assai modeste sono le nostre capacità di percepire differenti livelli di grigio, siamo in grado di rico-

noscere alcuni milioni di colori diversi.

Se si pensa che il composit di tre bande viene generalmente fatto dopo che ciascuna è stata elaborata separatamente, si comprende la grande quantità di immagini che è possibile estrarre da un nastro e quante poche sono le probabilità che i prodotti standard distribuiti dai centri di diffusione dei dati siano le migliori per la nostra ricerca.

Il problema della rappresentazione contemporanea di quasi tutta l'informazione contenuta in un elevato numero di bande su di un'unica immagine viene in parte risolto attraverso un'elaborazione statistica, possibile solamente grazie al formato digitale dei dati.

Vi è infatti generalmente un'alta correlazione fra l'informazione contenuta nelle varie bande, cosa che implica un'alta ridondanza nei dati. E' possibile massimizzare le differenze esistenti all'interno di un insieme di dati rappresentandoli in uno spazio in cui gli assi cartesiani vengono spostati e ruotati in modo da farli coincidere con direzioni di massima varianza. Il valore corrispondente alle coordinate dei punti nel nuovo sistema di riferimento viene utilizzato per produrre nuove immagini. Secondo l'asse di massima varianza si avrà la prima Componente Principale (PC1) che nelle immagini Landsat arriva a contenere l'80-90% dell'informazione; perpendicolarmente a quella la seconda (PC2), e così via (figg. 11 a, b e c).

Con le prime tre componenti principali, che possiamo rappresentare contemporaneamente per mezzo dei tre colori fondamentali, si riesce a rappresentare più del 99% dell'informazione contenuta nelle diverse bande.

Il significato fisico di ciascuna componente principale non è definito in modo univoco, ma le immagini prodotte, se accompagnate da una buona indagine



Fig. 9 - Equalizzazione dell'immagine rilevata in Banda 4 (cfr. con l'immagine di destra della figura 5).

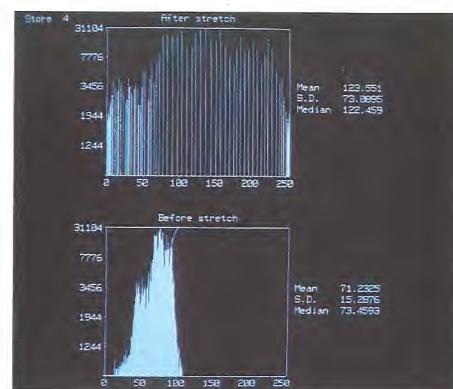


Fig. 10 - Istogramma di frequenza dell'immagine originaria (in basso) e di quella equalizzata (in alto).

al suolo, permettono di discriminare assai bene le differenti superfici presenti nella scena.

In alcuni casi non è tanto l'informazione contenuta nei singoli pixels che ci interessa, bensì la sua variazione spaziale. Si rende in questi casi necessario evidenziare al massimo la variazione di luminosità fra un pixel e l'altro (edge enhancement), o, al contrario, ridurre le variazioni (smoothing) per mettere in evidenza grandi superfici con riflettività simile senza che l'occhio venga disturbato dai particolari minuti.

Per fare ciò si fa "correre" lungo la matrice un filtro numerico (figg. 12 e 13) che modifica il valore di ciascun pixel tenendo conto di quello dei pixels vicini. E' giusto quindi sottolineare che, mentre le elaborazioni fino ad ora illustrate (stretching) modificano solo "visivamente" l'immagine, variandone il contrasto, i filtri invece cambiano "realmente" i valori dei pixels. Scegliendo opportuni filtri direzionali è possibile esaltare variazioni secondo direzioni particolari e mettere così in risalto delle "lineazioni" nella scena.

Elaborazioni spesso usate per mettere in evidenza le differenze esistenti fra le bande originali si basano su operazioni aritmetiche seguite sulle bande stesse. Quella più frequentemente utilizzata è costituita dal rapporto fra i valori dei pixels di una banda e i corrispondenti di un'altra.

Una elaborazione di grandissima utilità negli studi forestali ed agronomici è quella che permette di avere un'immagine rappresentativa della quantità di vegetazione presente in ciascun pixel. Questa si basa sul fatto che la vegetazione assorbe molto la luce rossa, mentre riflette molto nell'infrarosso vicino. Il confronto automatico fra le immagini delle due bande (Banda 5 e Banda 7 per l'MSS; Banda 4 e Banda 5 per il TM) permette di evidenziare i punti in cui il primo valore è bas-

so e in cui, contemporaneamente, il secondo è alto: tale operazione, generalmente espressa come:

$$\frac{\text{IR vicino} - \text{Rosso}}{\text{IR vicino} + \text{Rosso}}$$

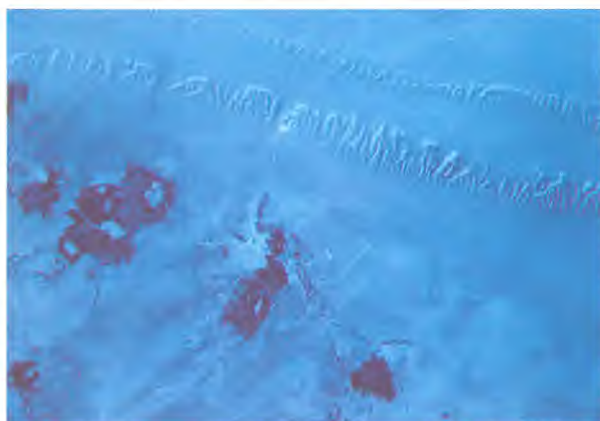
prende il nome di Indice di Biomassa (IB) o di Normalized Vegetation Index (NVI) (fig 14. e tav IIb).

Questo indice si presta ad essere applicato in aree con copertura vegetale non particolarmente abbondante poiché, oltre certi valori di densità foliare, come ad esempio nella foresta pluviale, la sua crescita non segue in modo diretto quella della quantità di vegetazione presente (HOWARD, 1983).

Un'altra elaborazione, da poco introdotta, è detta Tasseled Cap transformation (TC) e rende di facile interpretazione le differenze nei suoli e nella vegetazione dato che deriva da una elaborazione che tiene conto direttamente di caratteristiche fisiche. Il valore di ciascun pixel deriva dalla somma dei singoli valori di ciascuna banda del TM, moltiplicati per dei coefficienti fissi, e di un termine noto (offset) (tab. 2). Si ottengono così tre immagini, una definita di "Brightness", una di "Greenness" ed una di "Wetness", stampate rispettivamente in rosso, verde e blu.

Oltre a queste elaborazioni classiche ve ne sono ovviamente molte altre la cui utilità è diversa da disciplina a disciplina, da ambiente ad ambiente, da caso a caso. E' però necessario mettere in guardia coloro che si avviano a questa materia: è facile perdere il controllo delle elaborazioni che con grande facilità e rapidità gli elaboratori ci consentono di fare.

Può capitare spesso di mettere in risalto forme che non trovano poi alcuna corrispondenza con la realtà;



a	b
c	

Fig. 11 - Area di Kebili-Mansoura: immagini della Prima (a), Seconda (b) e Terza (c) Componente Principale.

Tab. 2 - Tabella dei coefficienti della trasformazione TC (CRIST et al., 1986).

Banda TM	Brightness	Greenness	Wetness
1	0.2909	-0.2728	0.1446
2	0.2493	-0.2174	0.1761
3	0.4806	-0.5508	0.3322
4	0.5568	0.7221	0.3396
5	0.4438	0.0733	-0.6210
7	0.1706	-0.1648	-0.4186
Offset	10.3695	-0.7310	-3.3828

è quindi opportuno avere sempre chiaro il significato fisico di ogni elaborazione che si va a fare ed effettuare un cospicuo numero di controlli a terra per verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti.

CLASSIFICAZIONE

Le elaborazioni cui abbiamo ora accennato consentono di rendere le immagini più facilmente interpretabili o di estrarre da esse quelle informazioni più legate ai diversi campi di applicazione; il riconoscimento delle varie superfici deve però essere fatto, in modo soggettivo, dall'operatore sulla base della sua esperienza e sulle informazioni rilevate a terra.

In alcuni settori, e in particolar modo nella preparazione di carte dell'uso del suolo, si preferisce al contrario procedere in modo automatico, partendo dai

dati originali fino ad arrivare alla carta da stampare; ovviamente ciò non esonera, come vedremo, dall'effettuare numerosi ed accurati controlli sul terreno.

Il principio su cui si basano le classificazioni automatiche è quello per cui le diverse superfici hanno differenti riflettività nelle varie lunghezze d'onda. Avendo a disposizione un archivio di firme spettrali sarà possibile confrontarle con quelle di ciascun pixel e riconoscerle così in modo automatico le varie superfici che costituiscono una scena. Di fatto è impossibile disporre di un archivio del genere dato l'elevato numero di superfici presenti sulla Terra e anche l'estrema variabilità delle firme spettrali in funzione di fattori locali (geologia, pedologia, microclima, conduzione agricola ecc.).

E' quindi necessario costituire un piccolo archivio per la particolare area oggetto di studio. Ciò viene fatto con indagini a terra nelle quali si compila, per alcune parti della scena, una carta dei diversi tipi di superficie presenti.

Sarà quindi possibile, confrontando questa con i dati rilevati da satellite, conoscere la firma spettrale, per le bande utilizzate, delle varie superfici. Il confronto fra le firme spettrali dei punti noti e quelle dei rimanenti punti della scena permetterà l'attribuzione dei vari pixels alle differenti categorie di superficie.

Esistono vari modi per estrapolare i dati acquisiti in campagna e per poter quindi classificare tutta l'immagine. Questi diversi metodi, fra cui ricorderemo la "box classification" e la "maximum likelihood", si differenziano sia per la velocità di esecuzione che, inversamente, per l'accuratezza dei risultati ottenibili.

La "box classification", che consiste essenzialmente in una serie di slicing effettuati su più bande, è una



Fig. 12 - Cuestas del Djebel Tebaga; confronto fra la Banda 4 originale (a destra) e la stessa banda con filtro "smoothing" (9x9) (a sinistra).

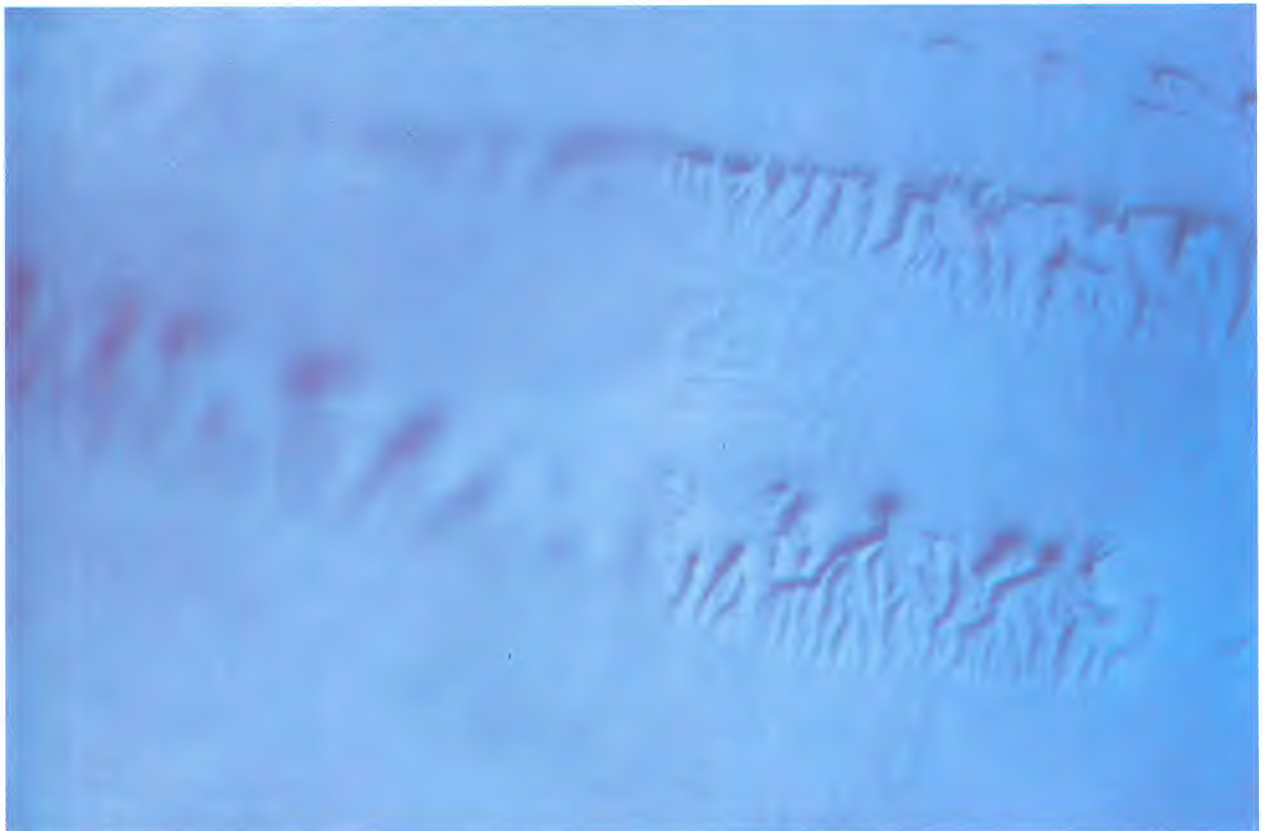


Fig. 13 - Cuestas del Djebel Tebaga; confronto fra la Banda 4 originale (a destra) e la stessa banda con filtro "edge enhancement" (9x9) (a sinistra).



Fig. 14 - Area di Kebili-Mansoura: immagine dell'Indice di Biomassa (IB). I valori più alti del IB sono rappresentati con le tonalità più chiare.

di quelle più frequentemente utilizzate per realizzare carte automatiche da dati telerilevati, grazie al suo buon rapporto fra accuratezza dei risultati e tempi di calcolo. Non è comunque utilizzabile quando vi è una buona correlazione fra le risposte spettrali delle differenti superfici nelle varie bande. In questo caso viene utilizzata la "maximum likelihood" che usa il vettore medio e la matrice di covarianza dei dati controllati in campagna per distribuirli secondo dei raggruppamenti spaziali; ogni pixel viene poi classificato attribuendolo alla classe alla quale ha più probabilità di appartenere.

Il metodo appena descritto presuppone un indagine a terra precedente all'elaborazione (supervised classification). I punti di controllo possono essere decisi in vario modo: secondo una maglia regolare, con la generazione di punti in modo casuale, sulla base di cartografie o di studi precedenti, ecc. Rimane comunque il problema che se i punti a terra non interessano tutti i principali tipi di superficie nell'elaborazione finale rimarremo con un certo numero di pixels non attribuiti a nessuna classe.

Per ovviare a ciò si può procedere in modo opposto: effettuare il controllo a terra dopo la classificazione (unsupervised classification). In questo caso l'elaborazione automatica costituirà dei gruppi di pixels con firma spettrale simile senza sapere a cosa essa si riferisce. Fatto ciò, viene disegnata una carta di superfici simili in cui manca la legenda. I controlli a terra verranno quindi eseguiti su di un campione delle differenti superfici e alle varie classi verrà così attribuito un nome. In questo modo si possono ridurre al minimo i punti di controllo senza correre il rischio di tralasciare superfici importanti.

APPLICAZIONI

Cartografia di base

Molti paesi compresi nella fascia tropicale mancano ancora di una cartografia a media scala (1/250.000 e 1/100.000) almeno per alcune parti del loro territorio. I tempi ed i costi per la realizzazione di una copertura cartografica completa per mezzo dell'aereofotogrammetria sono spesso inconciliabili con le loro necessità e possibilità.

Le immagini rilevate da satellite, almeno fino alla messa in orbita dello SPOT, per la scarsa risoluzione e per le molte correzioni geometriche che richiedono non sono certamente uno strumento cartografico ottimale, ma i primi tentativi di cartografia fatti con immagini MSS hanno dato risultati incoraggianti. Per mezzo della correzione geometrica dell'immagine effettuata con l'ausilio di un certo numero di punti di coordinate note a terra, è stato possibile realizzare la cartografia preliminare in scala 1/250.000 in molti paesi in cui era assente.

Per quanto riguarda le correzioni geometriche, uno dei problemi principali è costituito dall'individuazione dei punti di controllo che devono essere punti ben identificabili sia sul terreno che sulle immagini. Il problema è particolarmente sentito nelle zone desertiche, dove anche le piste non costituiscono elementi stabili del paesaggio. In questi casi è necessario ricorrere ad elementi geomorfologici o strutturali, come è stato fatto, ad esempio, per le correzioni di immagini della Tunisia presahariana, dove come punti di controllo sono stati usati gli "spring mound", collinette che si formano in corrispondenza di punti di risalita dell'acqua (MARINI & ONGARO, 1988).



Fig. 15 - Particolare di un foglio della carta topografica in scala 1:100.000 dell'Egitto realizzata sulla base di riprese Landsat TM (da MEHLBER & KAHLER, 1987).

Le possibilità attuali sono poi notevolmente aumentate con la messa in orbita del satellite SPOT in cui la banda pancromatica ha una risoluzione di 10 metri. Al momento le applicazioni dei dati rilevati da questo satellite sono ancora scarse e quanto pubblicato si riferisce essenzialmente alle simulazioni effettuate nella fase di progettazione, ma è certo che costituiranno un elemento fondamentale per la creazione della cartografia nelle zone ancora scoperte e per l'aggiornamento dei documenti già realizzati. Le scale in cui si prevede di poter costruire le carte vanno dal 100.000 al 25.000.

Una valutazione positiva delle possibilità di utilizzazione delle immagini SPOT in cartografia è venuta dal confronto realizzato sovrapponendo ad una cartografia tradizionale a scala 1:50.000 le immagini della banda infrarossa e pancromatica ricampionate per portare la risoluzione a 5 metri (VAN DER LOAN, 1987).

Un procedimento simile è stato adottato anche per la realizzazione di una carta in scala 1:100.000 dell'Egitto (fig. 15) utilizzando immagini Landsat TM (MEHLBEUER *et al.*, 1987).

Queste sono state prima corrette geometricamente utilizzando anche punti di controllo individuati su foto prodotte dalla Large Format Camera (LFC) ospitata a bordo dello Shuttle. La base topografica è costituita dal "composit" di Banda 1, Banda 2 e Banda 3 stampato in Blu-Verde-Rosso in modo da ottenere colori quasi naturali (True Color Composit). Informazioni aggiuntive (forme di erosione, campi di dune, ecc.) sono state ottenute anche dall'analisi di tutte le altre bande.

Seppure in forma digitale le immagini da satellite non sono ancora in grado di portare alla realizzazione di una cartografia completamente automatica. Ottime

sono risultate invece le integrazioni dei dati da satelliti con quelli tradizionalmente gestiti attraverso i sistemi di informazione geografica (GIS) (GORTÉ *et al.*, 1987).

Anche se esula dai limiti che ci siamo imposti, è opportuno fare un cenno alle applicazioni delle immagini riprese con radar montati su aereo per la cartografia nella zona equatoriale. In quest'ambiente, per la copertura nuvolosa costantemente presente nelle ore diurne, è estremamente difficile realizzare una cartografia anche per mezzo di riprese aeree. Dato che ad alcune lunghezze d'onda a cui opera il radar i corpi nuvolosi sono trasparenti, le prime carte a media scala di alcuni paesi sono state realizzate proprio con riprese radar.

Cartografia tematica

Prima di passare ad analizzare i diversi tematismi derivabili dalle immagini da satellite è opportuno sottolineare che la cartografia tematica si basa ancora prevalentemente sull'interpretazione non automatica delle immagini.

Le classificazioni automatiche, sia supervised che unsupervised, sono ancora in fase di studio e di valutazione, specialmente per le loro applicazioni in campo geologico, geomorfologico e pedologico. Una stima della loro affidabilità è stata fatta da SIEGAL & ABRAM (1976) per la realizzazione di una carta geologica sulla base di dati Landsat MSS.

I vari tipi di classificazione adottati non hanno permesso di superare l'accuratezza del 50% anche se, a seguito di misure radiometriche a terra da 0.45 a 2.4 μ , si afferma che l'espansione del campo d'indagine oltre le bande dell'MSS porta un notevole incremento del-

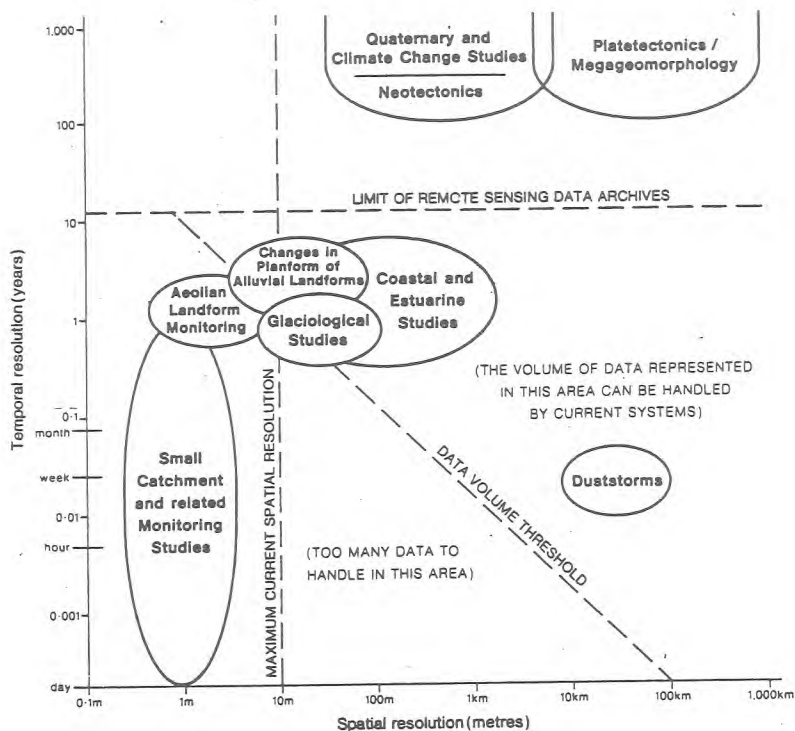


Fig. 16 - Applicazioni delle immagini da satellite per la cartografia geomorfologica in relazione alla risoluzione spaziale e temporale dei dati (da MILLINGTON & TOWNSHEND, 1984).

l'accuratezza. Le difficoltà nella classificazione automatica derivano dal fatto che la pendenza, l'esposizione, l'umidità e la copertura vegetale rendono spesso assai diverse le risposte dello stesso litotipo nei vari punti di affioramento.

A tale scopo, negli ultimi anni, si stanno cercando di realizzare dei sistemi automatici "intelligenti" che possano classificare le superfici tenendo conto anche dei diversi parametri che ne influenzano la risposta spettrale.

Andando a parlare di applicazioni specifiche del telerilevamento è opportuno rimarcare la necessità che l'utilizzatore partecipi in prima persona alla fase di elaborazione in modo da indirizzarla verso la realizzazione di immagini ottimali per gli scopi prefissati. Infatti, a differenza di quanto avviene per le fotografie aeree, le immagini da satellite derivano sempre e comunque da una precedente elaborazione che, per forza di cose, metterà in evidenza certi aspetti a discapito di altri.

Geologia, geomorfologia e pedologia

L'energia che attiva i sensori è riflessa od emessa da un sottilissimo strato superficiale dell'area indagata. Qualora la zona studiata sia coperta da vegetazione, l'informazione che possiamo trarre dai dati telerilevati si riferisce quasi esclusivamente a questa, anche se è talvolta possibile derivare dal tipo e dallo stato della vegetazione informazioni sul suolo e sulle sue disponibilità idriche. In prima approssimazione possiamo però asserire che quanto più densa è la vegetazione tanto minore sarà la capacità dei sistemi di telerilevamento di dare un contributo all'indagine geologica.

RICHARDSON & WIEGAND (1977) hanno studiato la possibilità di distinguere, nella risposta spettrale di una superficie, l'informazione dovuta al suolo da quella dovuta alla copertura vegetale per mezzo di indici di vegetazione opportunamente calcolati e confrontati fra di loro.

Alcuni risultati in questo senso sono stati ottenuti anche dal confronto fra la seconda Componente Principale e l'Indice di Biomassa (PRANZINI & DELLA ROCCA, 1986).

L'ambiente tropicale, nel senso più esteso del termine, occupa tutta quella fascia che, dai limiti del deserto, giunge fino alla foresta pluviale. E' evidente quindi che il contributo dato dal telerilevamento all'indagine geologica, geomorfologica e pedologica varierà notevolmente da caso a caso.

Una particolare attenzione dovrà essere posta inoltre nella scelta del periodo al quale si riferiscono le immagini da studiare in quelle zone in cui la copertura vegetale è costituita da erbe ed arbusti che si sviluppano nella stagione piovosa.

Ma non è sempre vero che è la stagione secca quella da preferire; talvolta il suolo completamente asciutto e la vegetazione secca residua rendono assai uniforme una scena, mentre nella stagione delle piogge, la diversa umidità che assumono i suoli e la diversa vegetazione che ospitano, sono elementi che possono guidare nel riconoscimento delle varie litologie.

E' comunque in condizioni di copertura vegetale scarsa o discontinua che il telerilevamento ha dato un aiuto notevole nella realizzazione di carte geologiche e pedologiche a piccola e media scala.

E' impossibile definire, in linea generale, quali bande o quali elaborazioni siano ottimali a questi scopi.

Le rocce sedimentarie, ad esempio, non mostrano particolari picchi di riflettività nel visibile e nell'infrarosso vicino, ma il loro riconoscimento può passare piuttosto attraverso il tipo di alterazione che subiscono, cosa che modifica notevolmente la loro risposta spettrale come appare dai molti studi pubblicati su questo argomento. A tal proposito è opportuno citare i lavori di HUNT & SALISBURY (1971 e 1974) che hanno portato alla definizione delle firme spettrali di circa 200 minerali e 150 tipi di roccia.

I tradizionali compositi di Banda 4 (blu), Banda

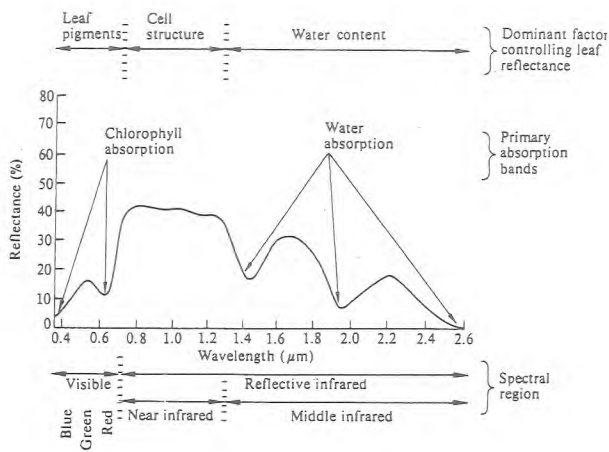


Fig. 17 - Curva di riflettività della vegetazione con indicazione delle regioni a diverso comportamento spettrale (da SWAIN & DAVIS, 1978).

5 (verde) e Banda 7 (rosso) dell'MSS sono stati usati con successo come base per una fotointerpretazione delle immagini da quelli utilizzatori che non avevano accesso diretto ad un sistema di image processing.

Gli altri ricercatori hanno sviluppato metodologie diverse che in alcuni casi hanno permesso un'utilizzazione più completa dell'informazione originaria. L'analisi delle componenti principali ha permesso di riconoscere con buona approssimazione limiti di formazioni, tipi di suoli e grado di alterazione della roccia. Un'altra elaborazione classica nell'indagine geologica effettuata sui dati MSS è il composit dei rapporti fra le bande (4/5, 4/6 e 6/7).

La disponibilità dei dati del Thematic Mapper, con 6 bande nel visibile/infrarosso medio ed una nell'infrarosso termico ha ovviamente aperto nuove prospettive e mosso la fantasia di chi elabora immagini.

Le bande 5 e 7 hanno dimostrato di essere un valido strumento per una stima dell'umidità dei suoli e per il riconoscimento delle differenti litologie.

L'aggiunta della Banda 6, nell'Infrarosso termico, sebbene con risoluzione di soli 120 metri, ha inoltre consentito l'utilizzazione di questa parte dello spettro elettromagnetico in studi a media scala a costi accessibili. Prima di allora in questa banda era possibile operare, o con risoluzione di circa 1 Km per mezzo dei satelliti NOAA, o con scanner termici montati su aereo che hanno una risoluzione spettrale e radiometrica maggiore, ma che implicano costi spesso proibitivi.

L'utilizzazione contemporanea dell'informazione contenuta nelle bande "riflessive" e in quella "emissiva" permette inoltre di valutare il rapporto fra l'energia assorbita da una superficie (coalbedo) e quella emessa. Ciò è indirettamente una misura dell'inerzia termica dei materiali che è da mettere in relazione alle caratteristiche litologiche, all'umidità e al grado di fratturazione delle rocce.

Per quanto riguarda l'analisi strutturale, l'altezza del sole sull'orizzonte al momento delle riprese (i satelliti Landsat passano sull'equatore alle 9.45, ora locale; lo SPOT alle 10.30) per gran parte dell'anno non è così favorevole come lo è alle medie ed alte latitudini, dove le ombre lunghe, pur dannose per quasi tutte le applicazioni, favoriscono il riconoscimento delle li-

neazioni. Dove la copertura vegetale ed il suolo sono scarsi si ottengono comunque ottimi risultati in particolare modo utilizzando filtri per il riconoscimento dei limiti e filtri direzionali.

Le informazioni strutturali sono poi un elemento fondamentale nella ricerca mineraria, settore in cui il telerilevamento ha dato sempre contributi essenziali, fin dal 1926, quando, allora con foto aeree, fu possibile localizzare un deposito di rame in Rhodesia (FAO, 1982); per giungere ai nostri giorni, con la messa a punto di spettrometri che attraverso il rilevamento su un elevato numero di bande strettissime (l'Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer - AVIRS - registra su 210 bande d'intervallo pari a 0.1 μ fra 0.4 e 2.45 μ) consentono il riconoscimento dei singoli minerali (VANE & GOETZ, 1988).

Ma è forse nell'idrogeologia che il telerilevamento ha le sue più importanti applicazioni in ambiente tropicale, sia per le possibilità intrinseche del sistema, sia per le necessità oggettive di queste zone. Già nello studio dei reticoli idrografici, elemento di partenza delle indagini idrogeologiche, il telerilevamento da il suo contributo non solo con le immagini prodotte dai sensori tradizionali, ma anche ed essenzialmente con il radar che consente la penetrazione attraverso la densa vegetazione tropicale come dimostrato, ad esempio, dagli studi di MACDONALD (1969) in Colombia e a Panama.

Anche l'analisi litologica e strutturale forniscono una base essenziale per la ricerca dell'acqua nel sottosuolo, e a questa si affiancano tutte quelle informazioni di superficie, quali l'umidità del suolo e lo stato della vegetazione, direttamente correlabili con la presenza di falde poco profonde.

Nelle pianure alluvionali, opportuni confronti fra le varie bande consentono inoltre di mettere in evidenza paleovalci percorsi o meno dall'acqua di sottosuolo. A questo scopo di grande utilità è l'uso di immagini riprese nell'infrarosso termico, dove, purtroppo, la risoluzione del TM è assai minore.

In questo campo del telerilevamento, dove si opera ancora prevalentemente da aereo, di fondamentale importanza è la scelta dell'ora della ripresa (LYNN, 1985) e la possibilità di confrontare immagini rilevate in ore diverse. L'utilizzazione contemporanea di riprese nel visibile/infrarosso vicino e nell'infrarosso termico consente inoltre una valutazione dell'evapotraspirazione reale (MENENTI, 1983 e NIEUWENUIS & MENENTI, 1986).

In campo geomorfologico, ossia nell'analisi delle forme e dei processi della superficie terrestre, le limitazioni cui abbiamo accennato in precedenza sono assai minori.

Notevoli applicazioni di queste metodologie per la realizzazione di carte geomorfologiche si sono avute in ambiente desertico (ALESSANDRO & RODOLFI, 1988).

I margini di queste aree sono poi in rapida evoluzione con una generalizzata espansione dei deserti che è possibile seguire con il confronto fra immagini riprese in anni successivi. Lo studio di questo processo non necessita solo indagini a grande scala, quali quelle eseguite su immagini Landsat e SPOT, ma anche una visione sinottica del problema quale è possibile su immagini Meteosat. A questo riguardo di grande importanza sono anche gli studi effettuati, sulle stesse immagini, sulle traiettorie tenute dai sedimenti trasportati dal vento, differenziando le zone di erosione eolica da quelle di sedimentazione nell'ambito di un pro-

cesso determinante ai fini della desertificazione (MAIN-GUET *et al.*, 1984).

Una valutazione delle possibilità dei vari sistemi di telerilevamento per lo studio dell'erosione superficiale in Africa è stata fatta da MILLINGTON & TOWNSEND (1984). Agli stessi Autori (1986) si deve un'analisi delle potenzialità del telerilevamento in campo geomorfologico in cui vengono messi in evidenza i processi che possono essere studiati in funzione della risoluzione spaziale e temporale dei dati disponibili (fig. 16).

Risorse agricole ed uso del suolo

La copertura vegetale, come abbiamo visto, costituisce l'elemento principale dell'informazione contenuta nelle immagini telerilevate. La definizione delle bande in cui operano i sensori è stata inoltre fatta tenendo conto prevalentemente delle applicazioni agronomiche del telerilevamento. Gran parte delle bande del Thematic Mapper, ad esempio, sono centrate su quelle lunghezze d'onda in cui la vegetazione assorbe o riflette maggiormente o in cui vi è un forte assorbimento da parte dell'acqua presente nelle foglie.

Il comportamento della vegetazione nei confronti della luce incidente varia infatti in funzione della lunghezza d'onda e può essere schematizzato identificando tre diverse regioni nello spettro elettromagnetico (fig. 17): fra 0.4 e 0.7 μ la risposta spettrale è direttamente correlata con la quantità di pigmenti presenti e quindi con le capacità fotosintetiche delle foglie e con il loro stato fenologico; fra 0.74 e 1.1 μ la risposta è correlata alla densità delle foglie verdi e quindi alla copertura vegetale; fra 1.3 e 2.5 μ la risposta è correlata al contenuto d'acqua nelle foglie.

Tutto ciò determina le bande a cui si fa riferimento nello studio del tipo, della densità e dello stato della vegetazione. Queste caratteristiche peculiari della vegetazione hanno fatto sì che, fin dalla messa in orbita del Landsat 1 (allora chiamato ERST-1), il settore che più si è avvantaggiato da queste tecnologie è quello indirizzato all'indagine agronomica e forestale.

In questo campo notevoli applicazioni si sono avute anche con i dati rilevati dal sensore AVHRR dei satelliti NOAA-6, 7 e 8, che hanno permesso di avere un quadro sinottico dello sviluppo stagionale della vegetazione nella fascia intertropicale. Ciò è stato ottenuto utilizzando le bande di assorbimento (rosso) e di riflessione (infrarosso vicino) delle piante creando indici vegetazionali per le diverse stagioni dell'anno. L'elevata frequenza delle riprese consente infatti di superare gran parte dei problemi dati dalla copertura nuvolosa.

TUCHER ed altri (1985) utilizzando gli indici di vegetazione hanno seguito per 19 mesi, dall'Aprile 1982 al Gennaio 1983, l'evoluzione della vegetazione in Africa mettendo bene in evidenza i suoi legami con lo spostamento stagionale della fascia di convergenza intertropicale.

Sono state prodotte anche 21 immagini delle Componenti Principali dello stesso periodo che hanno permesso di discriminare fra 9 diversi tipi di copertura vegetale.

Altri satelliti meteorologici, come il Meteosat, sono stati utilizzati per lo studio della siccità in Africa (KALENSKY *et al.*, 1981).

In campo forestale, con studi a più grande scala, è possibile il riconoscimento delle diverse specie arboree dominanti grazie anche alle conoscenze a suo tem-

po acquisite con indagini effettuate utilizzando riprese aeree nell'infrarosso vicino. L'evoluzione del manto vegetale viene seguita per mezzo del confronto automatico fra immagini riprese in tempi diversi ed elaborate con le tecniche già descritte. E' così possibile mettere in evidenza zone soggette alla deforestazione per la produzione di legname o, cosa assai frequente nell'ambiente tropicale, bruciate dall'agricoltura itinerante.

La velocità con cui questi processi si sviluppano, e l'estensione delle aree interessate, rendono infatti possibile il monitoraggio anche da satellite.

Si tratta d'altra parte di operazioni estremamente semplici che generalmente comportano il confronto automatico fra l'immagine dell'Indice di Biomassa di un anno con quella di anni successivi. Istantanee riduzioni di questo parametro evidenziano uno dei processi studiati, mentre la forma dell'area disboscata e la riflettività nelle varie bande guidano nel riconoscimento dell'agente che ha operato.

Anche la classificazione delle aree forestate secondo tre metodologie tradizionali (Unesco, Yangambi e Hierarchical) ha dato buoni risultati su immagini SPOT (LANTIERI, 1985).

Ma il riconoscimento delle aree vegetate da quelle scoperte dalla vegetazione è un'applicazione estremamente ridotta del telerilevamento.

Abbiamo visto nel primo paragrafo come superfici diverse abbiano una differente firma spettrale e come sia possibile il loro riconoscimento automatico. Ciò consente di realizzare carte dell'uso del suolo su vaste superfici con un numero limitato di controlli a terra.

Per la realizzazione di carte automatiche dell'uso del suolo il riconoscimento delle varie colture avviene generalmente attraverso una classificazione supervised. Dato che la firma spettrale di un tipo di coltura è influenzata da altri parametri oltre a quelli relativi al tipo vegetazionale, come l'esposizione, la pendenza, l'umidità del suolo ecc., una buona classificazione si ottiene dove le superfici coltivate sono omogenee e i singoli appezzamenti hanno dimensioni di uno o due ordini di grandezza superiori alla risoluzione a terra del sensore.

Un'indagine ancora più approfondita passa attraverso un'analisi multitemporale, nella quale gli indici vegetazionali relativi a ciascuna stagione vengono messi a confronto con il calendario agricolo della regione studiata.

Anche in questo caso la scelta delle date a cui fare riferimento è spesso determinante per il buon esito delle indagini. La firma spettrale delle varie colture varia infatti nel corso della stagione e in alcuni momenti non sarà possibile riconoscere l'una dall'altra. Nel caso si debba procedere alla stima della superficie coltivata con una determinata specie, si dovrà scegliere il periodo dell'anno in cui questa ha una firma spettrale che più si discosta da quella delle coltivazioni presenti nella stessa regione. Da questo risulta che l'acquisto di una scena è condizionato da molti fattori e difficilmente l'immagine ottenuta potrà essere la migliore per più applicazioni.

Le variazioni della firma spettrale nel corso della stagione sono poi altamente correlate con la quantità di prodotto che verrà alla fine ottenuto. Il loro studio potrà quindi consentire una previsione sulla produzione, cosa assai importante in paesi caratterizzati, per ragioni climatiche, da forti variabilità annue.

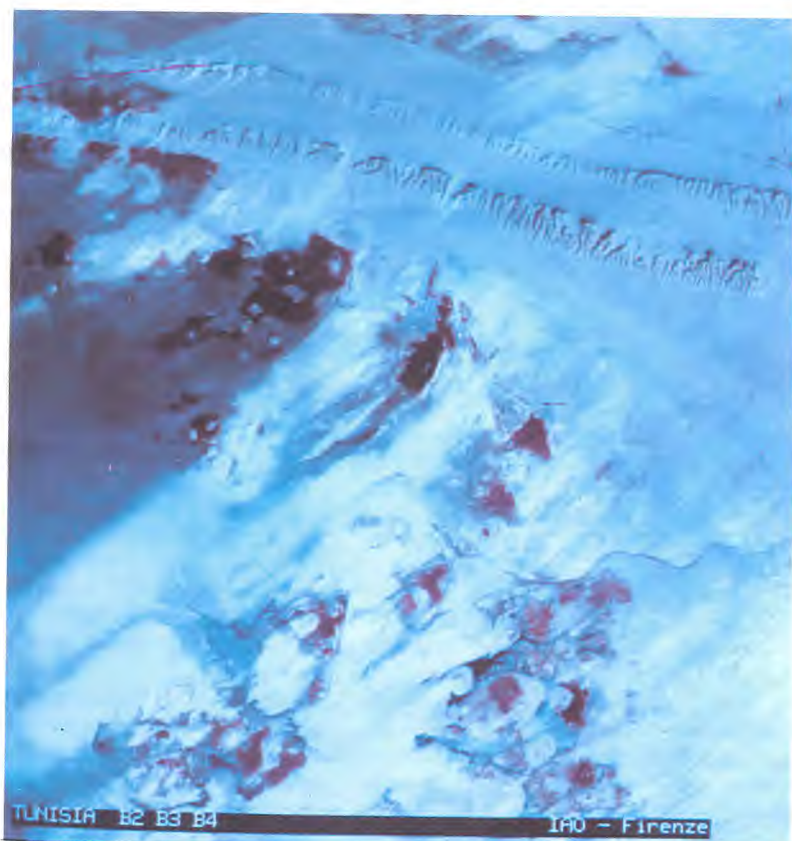
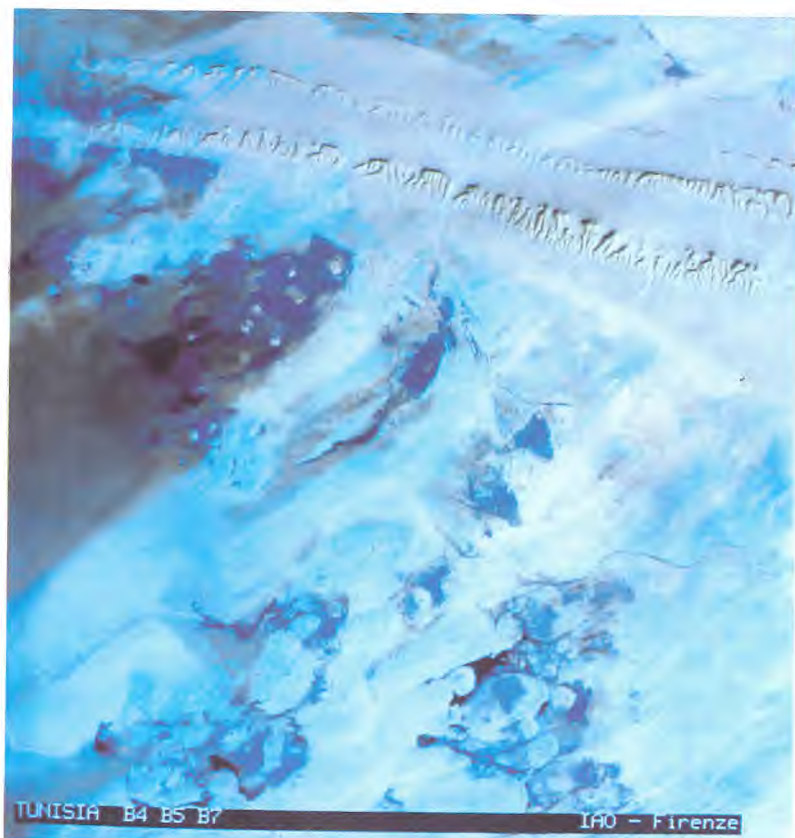


TAVOLA I

Area di Kebili-Mansoura (Tunisia Meridionale) - Landsat TM, 11 dicembre 1987.

a) Composit classico delle bande 2 (blu), 3 (verde) e 4 (rosso).



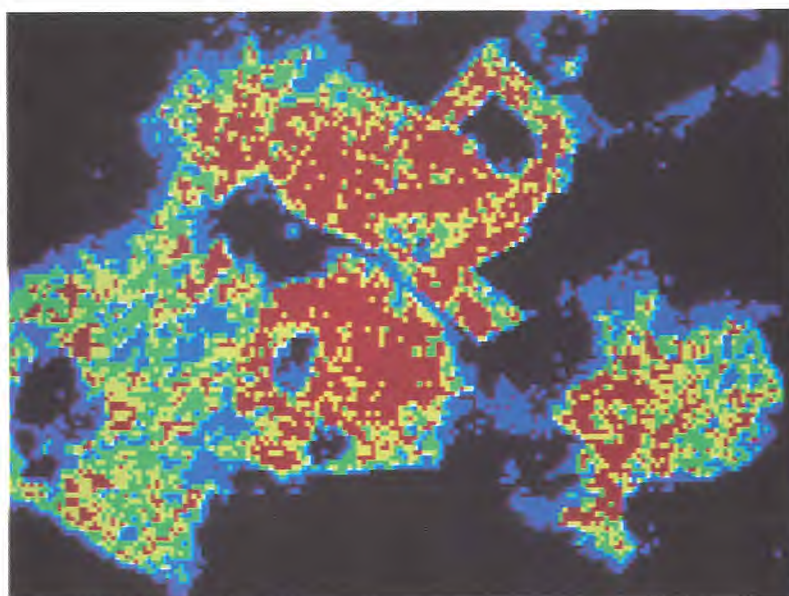
b) Composit delle bande rilevate nell'infrarosso: 4 (blu), 5 (verde) e 7 (rosso).



TAVOLA II

Area di Kebili- Mausoura (Tunisia Meridionale) - Landsat TN, 11 dicembre 1987.

a) Composit delle prime tre componenti principali: PC I (blu), PC II (verde) e PC III (rosso).



b) Slicing di un particolare dell'immagine relativa all'Indice di Biomassa nell'oasi di Mansoura. I colori, dal blu al rosso, indicano densità di vegetazione crescenti.

Purtroppo, nei paesi in via di sviluppo sono ancora pochi i centri in cui si può procedere all'elaborazione diretta dei dati non appena questi sono stati inviati a terra (FAO, 1984) e la disponibilità dei nastri si realizza con un notevole ritardo. Ciò pone notevoli limiti ad una piena utilizzazione che vedrebbe, fra l'altro, il monitoraggio delle superfici verdi nelle aree di pascolo, cosa che potrebbe indirizzare in quelle zone gli allevatori nomadi, per mezzo di un servizio di rapida informazione.

Per quanto riguarda l'uso del suolo si accennerà infine ad un problema che sta divenendo di grande importanza in tutti i paesi in via di sviluppo, cioè quello della rapida crescita urbana, con la perdita del terreno agricolo circostante e l'allontanamento progressivo delle fonti di approvvigionamento per il combustibile. I satelliti della seconda generazione (Landsat 5 e SPOT) permettono l'aggiornamento delle carte dell'uso del suolo in quei territori in cui il processo è più rapido.

CONCLUSIONI

Il telerilevamento costituisce un indispensabile strumento per lo studio e la gestione dell'ambiente tropicale a condizione che nei singoli paesi interessati si sviluppino possibilità e capacità autonome per quanto riguarda l'elaborazione e l'interpretazione dei dati rilevati dai satelliti.

Contrariamente a quanto accadeva negli anni passati esistono oggi sistemi di elaborazione a basso costo e di facile utilizzazione che permetteranno lo sviluppo di centri di telerilevamento autonomi. Anche le metodologie d'indagine sono state abbondantemente collaudate e la loro messa in opera non richiede oggi eccessive specializzazioni. Rimane tutt'ora il problema della preparazione degli utilizzatori dato che in molti istituti universitari, non solo nei paesi in via di sviluppo, ma anche del mondo occidentale, queste discipline non vengono insegnate nei corsi ufficiali, sia per mancanza di tradizione che di adeguati strumenti didattici.

TESTI CONSIGLIATI

BARRETT E.C. & CURTIS L.F. (1976) - Introduction to environmental Remote Sensing. Chapman & Hall, London. pp. 336.

CAPPELLINI V. (1985) - Elaborazione numerica delle immagini. Boringhieri, Torino. pp. 343.

CASTELMAN K.R. (1979) - Digital image processing. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. pp. 429.

COLWELL R. N. ED. (1983) - Manual of Remote Sensing. Am. Soc. of Photogrammetry. The Sheridan Press, USA. pp. 2440.

CURRAN P.J. (1985) - Principles of Remote Sensing. Longman, London. pp. 282.

DRURY S.A. (1987) - Image interpretation in Geology. Allen & Unwin, London. pp. 243.

GONZALEZ R.C. & WINTZ P. (1977) - Digital image processing. Addison Welsey Pub. Co., London. pp. 431.

JENSEN J.R. (1986) - Introductory digital image processing. A Remote Sensing perspective. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. pp. 379.

HORD R.M. (1982) - Digital image processing of remote sensed data. Academic Press, New York. pp. 256.

LILLESAND T.M. & KIEFER R.W. (1987) Remote Sensing and image interpretation (second edition). John Wiley & Sons, New York. pp. 721.

MATHER P.M. (1987) - Computer processing of remotely-sensed images. John Wiley & Sons, New York. pp.352.

MULDERS M.A. (1987) - Remote Sensing in soil science. Elsevier, Amsterdam. pp. 379.

NIBLACK K.R. (1976) - An introduction to digital image processing. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. pp. 215.

SABINS F.F. (1978) - Remote Sensing principles and interpretation. W.H. Freeman & Co., pp. 426.

SCHOWENGERDT R.A. (1983) - Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing. Academic Press, London. pp. 249.

SIEGAL B.S. & GILLESPIE A.R. (1980) - Remote Sensing in Geology. John Wiley & Sons, New York. pp. 702.

SWAIN P.H. & DAVIS S.M. (1978) - Remote Sensing: the quantitative approach. McGraw-Hill, New York. pp. 396.

SZEKIELDA K.H. (1986) - Satellite Remote Sensing for resources development. Graham & Trotman Ltd, London. pp. 221.

THOMAS I.L., BENNING V.M. & CHING N.P. (1987) - Classification of remotely sensed imagery. Adam Hilger, Bristol. pp. 268.

TOWNSHEND J.R.G. ED. (1981) - Terrain Analysis and Remote Sensing. Allen & Unwin, London. pp. 232.

VERSTAPPEN H.TH. (1977) - Remote Sensing in Geomorphology. Elsevier, Amsterdam. pp. 214.

LAVORI CITATI

ALESSANDRO V. & RODOLFI G. (1988) - Elaborazione di immagini Landsat TM per la classificazione del territorio nella Tunisia Meridionale (area campione "Djebel-Toual", Governatorato di Kebili). Riv. Agricoltura Tropicale e Subtropicale (in stampa).

CRIST E.P., LAURIN R. & CICONE R.C. (1986) - Vegetation and soils information contained in transformed Thematic Mapper data. Proc. IGARSS '86 Symp. Zurigo.

FAO (1982) - Seventh UN/FAO International training course in Remote Sensing applications to thematic mapper with special reference to land use. FAO RSC Series 20. pp. 163.

FAO (1984) - Remote Sensing applications for renewable resources in developing countries. FAO RSC Series 33, pp. 55.

GORTE B.G.H., MULDER N.J. & SIMONS K. (1987) - Building assistance for the extraction on topographical objects from remote sensing data. In BUCHROITHNER M.F. & KOSTKA R. (Ed.s), Remote Sensing: Towards operational cartographic application, 15-23.

HARDY J.R. (1981) - Data collection by remote sensing for land resource survey. In J. R. G. Townshend (Ed.) "Terrain Analysis and Remote Sensing". Allen & Unwin, London. pp. 16-37.

HOWARD J.A. (1983) - Reflective properties of natural surfaces with reference to digital analysis. FAO RSC Series 21, pp. 7.

HUNT, GRAHAM R. & SALISBURY J.W. (1971) - Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: II. Carbonates. Modern Geology, 2, 23-30.

HUNT, GRAHAM R. & SALISBURY J.W. (1971) - Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: XI. Sedimentary rocks. Modern Geology, 5, 211-217.

HUNT, GRAHAM R. & SALISBURY J.W. (1971) - Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: XII. Metamorphic rocks. Modern Geology, 5, 221-228.

HUNT, GRAHAM R. & SALISBURY J.W. (1974) - Mid-infrared spectral behaviour of igneous rocks. Environ. Res. Paper 496-AFCRL-TR-74-0625, pp. 142.

KALENSKY Z.D., HOWARD J.A., COLELLA G. & BARRETT E.C. (1985) - Agricultural drought monitoring by Meteosat in Africa. FAO RSC Series 35, pp. 13.

LANTIERI D. (1986) - Evaluation of SPOT. Simulation data for forest mapping and monitoring semi-arid areas: case study in Kenya. FAO RSC Series 40, 143- 150.

LYNN D. (1985) - The timeliness of thermal infrared data acquisition for soil and surficial material survey in humid temperate environments. Proc. 4th Symp. of ISSS Working Group, Remote Sensing for Soil survey. Wangeningen and ITC, Enschede.

MACDONALD H. (1969) - Geologic evaluation of radar imagery from Darien Province, Panama. Modern Geology, 1, 1-63.

MAINGUET M., BORDE J.M. & CHEMIN M.C. (1984) - Sedimentation eolienne au Sahara et sur ses marges. Travaux de L'institut de Geographie de Reims, 59/60, 15-27.

MARINI C.M. & ONGARO L. (1987) - Cartografia da immagini da satellite in Paesi in Via di Sviluppo. XXIV Convegno Nazionale Associazione Italiana di Cartografia (in stampa).

MEHLBEUER A. & KAHLER M. (1987) - Satellite image map of arid areas an example from Egypt. In BUCHROITHNER M.F. & KOSTKA R. (Ed.s), Remote Sensing: Towards operational cartographic application, 115-122.

MENENTI M. (1983) - A new geophysical approach using Remote sensing techniques to study groundwater table depths and regional evaporation from aquifers in deserts. Inst. for Land and Water management Research. Pub. 9, pp. 15.

MILLINGTON A.C. & TOWNSHEND J.R.G. (1984) - Remote Sensing applications in African erosion and sedimentation studies. Proc. Harare Symp. IAHS Pub. 144, 273-384.

NIEUWENHUIS G.J.A. & MENENTI M. (1986) - Application of Thermal Infrared Remote Sensing in Water Management of Humid and Arid Areas. Geocarto Int. 1, 35-47.

PRANZINI E. & DELLA ROCCA B. (1986) - The analysis of the evolu-

tion of coastal plains through Remote Sensing: a case study. Mem. Soc. Geol. It. 31, 319-331.

RICHARDSON A.J. & WIEGAND C.L. (1977) - Distinguishing Vegetation from Soil Background Information. Photogramm. Engn. and Remote Sensing, 43, 1541-1552.

SADOWSKI G.F. & COVINGTON S.J. (1987) - Processing and Analysis of Commercial Satellite Image Data of the Nuclear Accident Near Chernobyl, U.S.S.R. U.S. Geological Survey Bull. 1785, pp. 19.

SIEGAL B.S. & ABRAMS M.J. (1976) - Geological mapping using Land-

sat data. Photogramm. Engn. and Remote Sensing, 42, 325-337.

TUCKER J., TOWNSHEND J.R.G. & GOFF T.E. (1985) - African Land-Cover Classification Using Satellite Data. Science, 227, 369-375.

VAN DER LAAN F.B. (1987) - The potential of combined use of satellite data with topographic information. In BUCHROITHNEIR M.F. & KOSTKA R. (Ed.s), Remote Sensing: Towards operational cartographic application, 123-129.

VANE G. & GOETZ A.F.H. (1988) - Terrestrial Imaging Spectroscopy. Remote Sens. Environ., 24, 1-29.

