



Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia

(*) Direzione Regionale dell'Ambiente
Servizio per la disciplina dello smaltimento dei rifiuti



Insiel S.p.A.

(**) Laboratorio Sistemi Grafici

Studio dell'area di San Giorgio di Nogaro mediante l'utilizzo del sensore iperspettrale aviotrasportato MIVIS (PARTE GENERALE)



Comuzzi Alessandro (*), Zampierin Silvia (**)

INDICE

1 - Introduzione

2 - Correzione radiometrica e geometrica dei dati

Correzioni geometriche dei dati

Correzioni radiometriche dei dati

Livelli di pre-processamento delle immagini

3 - Elaborazione e interpretazione dell'immagine

Sintesi additive

Studio di singole bande

Indici derivati da rapporti fra bande

4 - Proposte di classificazione

Classificazione non controllata

Classificazione controllata

5 - Indagini geostatiche e analisi spaziali

6 - Conclusioni

Glossario

Bibliografia

1. Introduzione

Il presente lavoro mira alla valutazione delle potenzialità dei dati iperspettrali MIVIS per l'identificazione di aree degradate; l'area in esame comprende la zona industriale del comune di San Giorgio di Nogaro. I metodi di caratterizzazione o di individuazione di siti oggetto di discarica non regolamentata, si basano sulla misura di alcune proprietà fisiche specifiche che differenziano questi siti dai terreni circostanti.

Il sistema iperspettrale MIVIS montato su piattaforma aerea raccoglie informazioni su lunghezze d'onda che vanno dal visibile all'infrarosso termico in una serie discreta di bande contigue in grado di identificare, molte volte in modo univoco, oggetti o caratteristiche fenomenologiche di particolare interesse applicativo per gli studi di carattere ambientale, quali quelli appunto concernenti le discariche. Nella tabella 1 sono riportati per ciascuno dei 4 spettrometri le bande spettrali, gli intervalli di frequenza (espressi in μm) e le possibili applicazioni in cui le diverse bande possono dare un contributo informativo.

Le operazioni alle quali vengono sottoposti successivamente i dati ripresi vengono indicate come "analisi multispettrale" e si basano sulla differenza esistente tra le "risposte" degli oggetti presenti in una stessa scena a specifiche lunghezze d'onda, nonché sulle variazioni della risposta che uno stesso oggetto è in grado di fornire se analizzato in lunghezze d'onda differenti.

Il tipo di risposta associato e associabile a ciascun oggetto su più lunghezze d'onda, cioè la sua "firma spettrale", viene considerata una proprietà intrinseca che consente di isolarlo dall'ambiente circostante.

Per un completo sfruttamento delle informazioni telerilevate sarebbero tuttavia necessarie misure di calibrazione da effettuare a terra, relative alle condizioni fisiche di alcuni corpi presenti nella scena o, in taluni casi, come per l'inquinamento, a misure chimico-fisiche.

Canale o banda		Spettrometro 1
1	0,433-0,453	clorofilla in acqua
2	0,453-0,473	sostanza gialla in acqua
3	0,473-0,493	controllo inquinamento in acqua
4	0,493-0,513	studi geologici
5	0,513-0,533	sedimenti sospesi in acqua e controlli
6	0,533-0,553	sulle coste
7	0,553-0,573	sostanza organica nel terreno; inventario
8	0,573-0,593	forestale; studi sul fitoplancton
9	0,593-0,613	uso del suolo; presenza di clorofilla in
10	0,613-0,633	acqua; studi di mineralogia
11	0,633-0,653	mappe geologie
12	0,653-0,673	mappe geologie
13	0,673-0,693	tettonica; produttività del suolo;
14	0,693-0,713	studi sulle piogge acide
15	0,713-0,733	erosione
16	0,733-0,753	sedimenti sospesi in acqua
17	0,753-0,773	mappe geologie
18	0,773-0,793	inventario forestale
19	0,793-0,813	struttura della vegetazione
20	0,813-0,833	struttura della vegetazione
Spettrometro 2		
21	1,150-1,200	contenuto ferroso del terreno
22	1,200-1,250	contenuto ferroso del terreno
23	1,250-1,300	caratteristiche legate all'assorbimento di
24	1,300-1,350	ossigeno da parte del terreno
25	1,350-1,400	umidità dei suoli
26	1,400-1,450	umidità dei suoli
27	1,450-1,500	umidità dei suoli
28	1,500-1,550	umidità dei suoli
Spettrometro 3		
29 - 92	2,000-2,500	mappe geologie, studi di mineralogia,
(64 canali con ampiezza pari a 0,008 μ m)		litologia; studi sull'umidità del terreno, ecc.
Spettrometro 4		
93	8,200-8,600	controllo inquinamento termico
94	8,600-9,000	clorofilla in acqua
95	9,000-9,400	mappe degli incendi
96	9,400-9,800	mappe geologie
97	9,800-10,20	umidità del terreno
98	10,20-10,70	sedimenti sospesi in acqua; vapor d'acqua;
99	10,70-11,20	temperatura dell'acqua
100	11,20-11,70	ricerche sullo spandimento di olio
101	11,70-12,20	litologia
102	12,20-12,70	studi sulle piogge acide

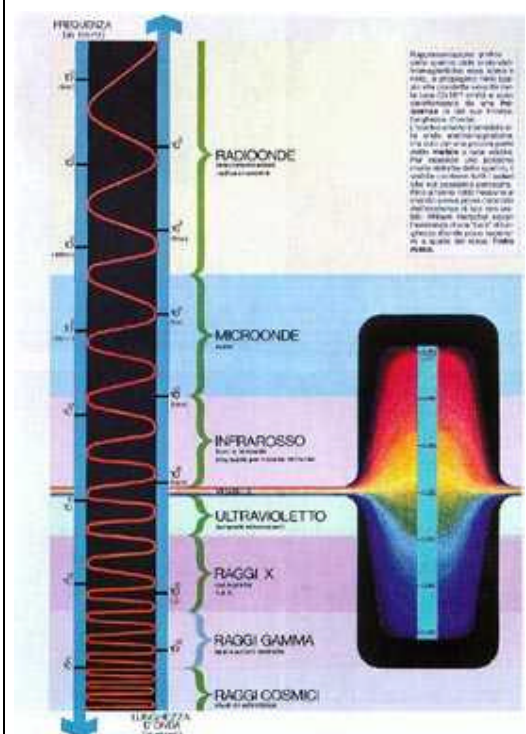


Tabella 1. Caratteristiche spettrali e di indagine dei 121 canali del MIVIS (?m).

In quest'ottica il Servizio per la Disciplina e lo Smaltimento dei Rifiuti ha commissionato al CISIG (Consorzio per l'innovazione dei Sistemi Informativi Geografici) il rilievo con il sensore aviotrasportato MIVIS di alcune zone della bassa friulana. I dati relativi alla missione sono riportati in tabella 2.

<i>Data della ripresa:</i>	21/02/2000
<i>Quota della ripresa:</i>	1500 m
<i>Risoluzione geometrica:</i>	2 mrad
<i>Pixel al suolo:</i>	3 x 3 m ²

	Ora della ripresa	Corpi neri
<i>Strisciata 1 (RUN 1-1)</i>	11.50	1-25 °C
<i>Strisciata 2</i>	11.56	1-25 °C
<i>Strisciata 3</i>	12.05	1-25 °C
<i>Strisciata 4</i>	12.12	1-25 °C
<i>Strisciata 5</i>	12.19	1-25 °C
<i>Strisciata 6</i>	12.26	1-25 °C

Tabella 2. Dati relativi alla missione di ripresa di alcune zone della bassa friulana.

In questo studio è stata utilizzata la strisciata 1, che comprende l'area industriale del comune di Torviscosa. L'immagine ottenuta è stata rappresentata in una matrice digitale di dimensioni 755 x 4000 x 102. Successivamente sono state individuate, attraverso l'analisi delle componenti principali, le bande più rappresentative del comportamento spettrale dei corpi presenti sulla scena come riportato in tabella 3.

	<i>Intervallo spettrale</i>	<i>Regione spettrale</i>
<i>Banda 3</i>	0.47-0.49 μ m	Blu
<i>Banda 7</i>	0.55-0.57 μ m	Verde
<i>Banda 13</i>	0.67-0.36 μ m	Rosso
<i>Banda 18</i>	0.77-0.79 μ m	Infrarosso Vicino
<i>Banda 21</i>	1.150- 1.2 μ m	Infrarosso Vicino
<i>Banda 98</i>	10.20- 10.70 μ m	Infrarosso Termico

Tabella 3. Caratteristiche spettrali di alcuni canali del MIVIS.

Al fine di migliorare l'accuratezza dei risultati delle elaborazioni si è tentato l'applicazione di algoritmi di correzione radiometrica dei dati, come verrà descritto in seguito.

In figura 1 sono rappresentate le firme spettrali tipiche di alcuni corpi; le porzioni dello spettro evidenziate in rosso sono quelle in cui il sensore MIVIS non fornisce informazioni.

Attraverso il seguente studio si cercherà di mettere a punto metodologie di trattamento delle immagini volte a individuare e classificare elementi e materiali urbani, rivestimenti delle superfici, infrastrutture urbane, depositi a cielo aperto, vegetazione, flussi d'acqua, ecc., ed, in particolare, aree degradate e/o potenzialmente inquinate. La possibilità di localizzare con il riconoscimento spettrale i siti inquinati costituisce un'interessante aiuto al rilevamento tradizionale.

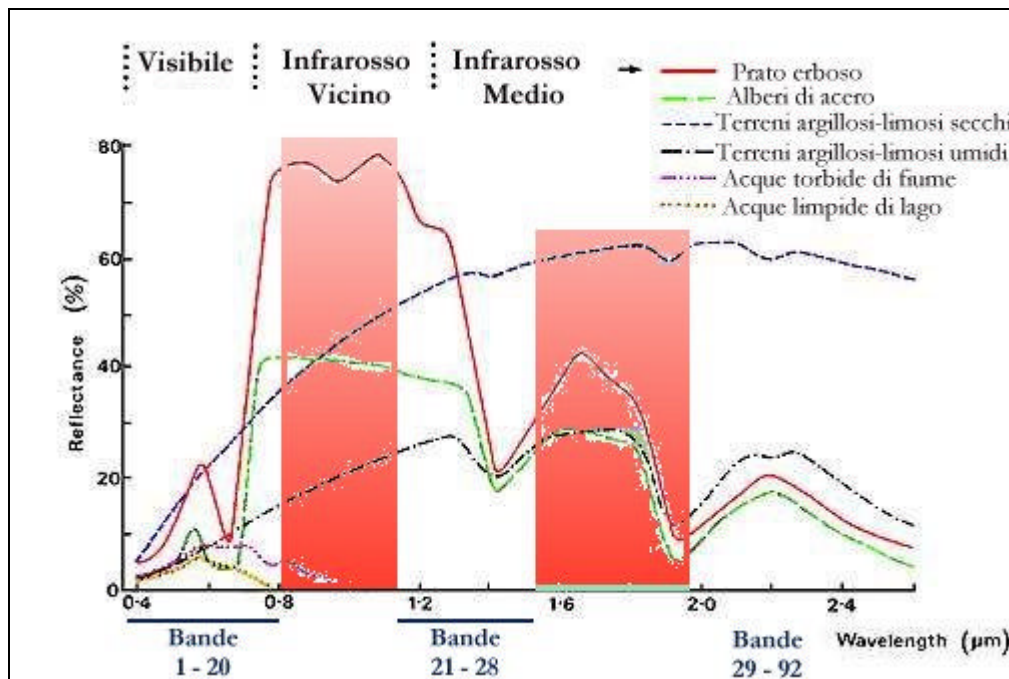


Figura 1. Alcuni spettri di riferimento e aree dello spettro dove il sensore fornisce informazioni.

Verranno utilizzate diverse tecniche di elaborazione delle immagini con lo scopo di ottenere il maggior numero possibile di informazioni utili per l'identificazione delle zone comprendenti discariche.

Prima di iniziare l'analisi multispettrale della zona, la scena investigata è stata valutata qualitativamente attraverso l'analisi visiva dei singoli canali. Tale analisi ha evidenziato, per la maggior parte dei canali riflessivi, un accettabile rapporto Segnale - Rumore (*Signal to Noise Ratio*, SNR). Soltanto la qualità di alcuni canali (31, 32, 63, 64, 88, 89, 90, 91, 92) è risultata insufficiente e tale da escludere il loro trattamento nel seguito del lavoro.

2. Correzioni geometriche e radiometriche dei dati

Al fine di migliorare l'accuratezza dei risultati ottenibile con i dati multispettrali a disposizione si è optato di tentare una correzione radiometrica dei dati con gli strumenti messi a disposizione dal software ENVI; la correzione radiometrica dei dati rappresenta una delle fasi più critiche della procedura di estrazione di informazioni dai dati telerilevati.

In teoria, affinché i dati si possano considerare pronti per le elaborazioni multispettrali, dovrebbero essere corretti sia geometricamente che radiometricamente. Nel nostro caso invece, i dati forniti dal CISIG sono stati corretti solo geometricamente e radiometricamente solo nel termico: manca la parte di correzione radiometrica nel visibile e nell'infrarosso vicino e medio. Questo tipo di correzione dovrebbe essere effettuato con l'apposito software MIDAS (*Multispectral Interactive Data Analysis System*), ma non è stato effettuato in quanto le immagini sono state fornite ad un basso livello di processamento (vedere più avanti).

Correzioni geometriche dei dati:

Le correzioni geometriche rettificano l'immagine per eliminare le distorsioni panoramiche dovute alla geometria dello scanner ed agli effetti introdotti dalle perturbazioni nella posizione e dall'altitudine della piattaforma dell'aereo.

Per questo tipo di operazioni MIDAS utilizza il GPS e riferimenti inerziali interni.

Correzioni radiometriche dei dati:

Le calibrazioni radiometriche dei dati sono da effettuare utilizzando le sorgenti di riferimento interne al MIVIS e i dati di calibrazione provenienti dal "test bench".

La calibrazione radiometrica interna calcola i valori di radianza per le bande 1-92 utilizzando un'equazione, che considera i dati non elaborati per ciascun pixel scalati del valore di uno dei due corpi neri interni al MIVIS, il valore migliorato selezionato durante il volo e il fattore di scala come determinato dal "test bench" su tutti i canali.

Per l'infrarosso termico (canali 93-102) la calibrazione radiometrica interna è ottenuta utilizzando differenti algoritmi che considerano le temperature dei due corpi neri interni.

Livelli di pre-processamento delle immagini:

In base alla documentazione fornita dal CNR riguardo ai dati MIVIS, il flusso di produzione dei dati MIVIS è strutturato nei seguenti 5 livelli di pre-processamento delle immagini:

livello 0: Dati grezzi accompagnati con informazioni ausiliarie per la calibrazione radiometrica e la correzione geometrica.

livello 1: Dati radiometricamente calibrati, utilizzando i riferimenti interni al MIVIS e le misure di sensibilità dello scanner come registrato nel "test bench".

livello 2: Dati corretti dagli effetti atmosferici e radiometricamente corretti come al livello 1.

livello 3: Dati provenienti dal livello 1 e 2 geometricamente corretti dalle distorsioni di panorama e dagli effetti dovuti al rollio, al beccheggio e alla strarizzata della piattaforma aerea. Questo tipo di correzione è condotto utilizzando informazioni ricavate dal "*MIVIS Position Attitude System*".

livello 4: Immagini georiferite ottenute integrando le informazioni sulla posizione del MIVIS e i sensori di navigazione con un modello digitale del terreno. Questo livello di produzione permette l'estrazione della posizione dei pixel in un'area non piana e la mosaicatura di strisciate adiacenti.

Il software MIDAS offre gli algoritmi sia per la correzione radiometrica dei dati che per la correzione geometrica dei dati.

Inoltre, durante le acquisizioni dei dati MIVIS si sviluppano in genere campagne di acquisizione dei dati a terra, per migliorare l'accuratezza delle correzioni radiometriche.

Al fine di superare le lacune dei dati a disposizione, si è tentato di procedere ad una correzione radiometrica dei dati utilizzando algoritmi forniti dal software ENVI per il processamento radiometrico delle immagini.

In particolare, dopo diversi tentativi si è adottato il seguente flusso di operazioni:

FFM Flat Field Method: metodo di correzione dei dati per ottenere la riflettanza apparente e che consiste nella normalizzazione delle immagini in base ad un'area di cui è nota la riflettanza assoluta.

MNF Minumun Noise Fraction: trasformazione per ricavare la dimensionalità inerente dei dati stimando il rumore statistico presente nei dati, e separare il rumore dai dati. Tale

elaborazione consiste in 2 trasformazioni delle componenti principali. La dimensionalità inerente dei dati è determinata dall'esame degli autovalori finali.

Inverse MNF Minumun Noise Fraction: trasformazione inversa ottenuta eliminando le bande che contengono solo rumore, in quanto bande di questo tipo non presentano nessuna informazione spaziale.

I risultati ottenuti hanno messo in evidenza il miglioramento delle informazioni presenti nella strisciata in termini di segnale-rumore, ma anche la necessità di affidarsi ad appositi strumenti (vedi MIDAS) per apportare le dovute correzioni radiometriche non immediatamente riproducibili mediante il software ENVI.

Tuttavia nel seguito verranno utilizzati i dati processati con questo tipo di elaborazioni, ben consapevoli della limitazione dovuta al fatto di non avere dei dati corretti radiometricamente; infatti le immagini a disposizione permettono di mettere in evidenza le differenze relative fra le superfici presenti nella scena, mentre un grosso limite consiste nella non-possibilità di confrontare questi dati in "termini assoluti", ad esempio, con librerie note in letteratura.

3. Elaborazione e interpretazione dell'immagine.

Nel seguito sono riportate le elaborazioni svolte in termini di analisi multispettrale della strisciata a disposizione riguardante l'area industriale di San Giorgio di Nogaro. Dopo aver studiato sintesi additive e opportune singole bande, si sono indagati particolari indici derivanti dal rapporto fra bande dello spettro e si sono elaborate proposte di classificazione delle aree indagate. Infine si sono svolte indagini geostatiche al fine di indagare le caratteristiche geometriche-tessiturali della zona.

Come si vedrà più avanti, dall'osservazione delle caratteristiche curve spettrali che si ottengono dalle misure, si nota una netta distinzione tra gli elementi acqua, suolo e vegetazione.

Possono presentarsi situazioni miste, che sono la combinazione, ad esempio, delle risposte ottenute dai tre elementi principali. Spesso la realtà è complicata dalle variazioni di umidità e dalla natura stessa dei suoli. Il contenuto d'acqua, per esempio, modifica la risposta degli elementi alterando in parte anche la curva caratteristica. L'analisi di queste situazioni intermedie può risultare decisiva nel descrivere e caratterizzare i fenomeni che interessano le aree degradate e/o potenzialmente inquinate.

SINTESI ADDITIVE:

Colori reali (13,7,1)



Le sintesi additive sono metodi per la riproduzione di un qualsiasi colore mediante la somma, in proporzione conveniente, dei tre colori primari additivi (blu, verde e rosso), utilizzando tre bande opportune.

Nella figura accanto la strisciata è stata rappresentata in colori reali assegnando al Rosso la banda 13 (0,66 ?m), al Verde la banda 7 (0,56?m) e al Blu la banda 1 (0,44 ?m).

Il colore scuro dei suoli è generalmente associato all'elevato contenuto di sostanza organica e all'umidità presente nei suoli.

La presenza di ferro in forma terrosa (stato ridotto), che normalmente si rinviene nei suoli umidi, determina il colore grigio, oliva o blu dei materiali.

Sintesi Falso Colore (18,14,7)



Lo studio in falso colore attua una conversione fra le bande di riflessione e il colore di rappresentazione: la lunghezza d'onda dell'infrarosso viene raffigurata in rosso, il rosso in colore verde e il verde in blu.

Banda 18 (0,78 μ m) $\rightarrow$ ROSSO

Banda 14 (0,70 μ m) $\rightarrow$ VERDE

Banda 7 (0,56 μ m) $\rightarrow$ BLU

Tale elaborazione è da usare come guida nella classificazione dell'immagine, in quanto si possono già evidenziare aree che hanno caratteristiche spettrali simili.

Luminose aree rosse rappresentano elevate riflettanze nell'infrarosso, generalmente corrispondenti a sana vegetazione, sia sotto coltivazione che lungo le rive dei fiumi.

Aree rosse leggermente più scure rappresentano vegetazione naturale, generalmente in terreni più accidentati, corrispondenti principalmente a boschi di conifere.

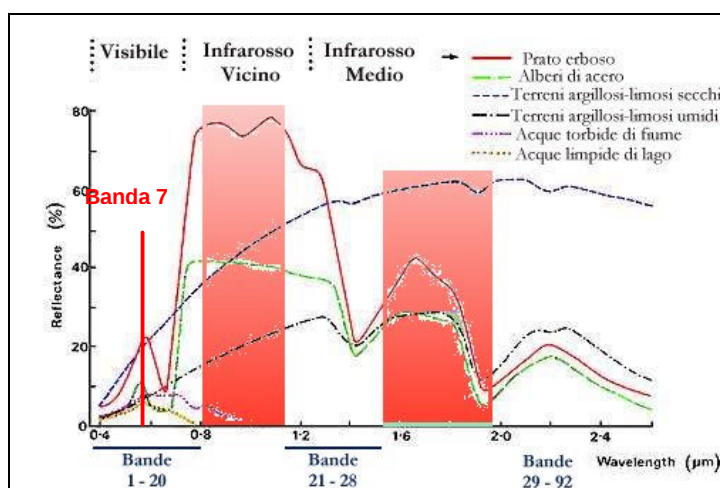
Tale immagine è utile anche come supporto alla lettura dell'umidità del suolo e allo studio della vegetazione.

STUDIO DI SINGOLE BANDE:

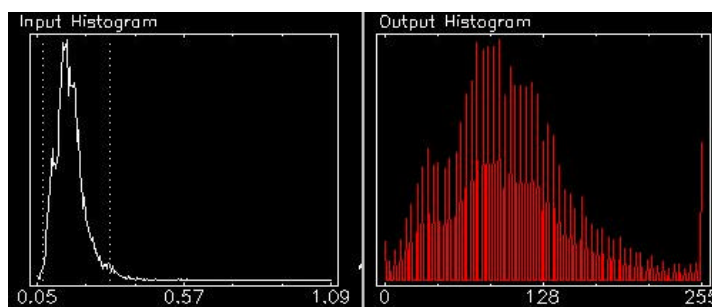
Banda 7 (0,56 μ m)



La banda 7 corrisponde alla lunghezza d'onda di 0,56 μ m e si colloca nella regione spettrale del verde. In questa regione la differenziazione fra le superfici naturali è scarsa e il contrasto fra suoli asciutti e umidi si mantiene basso; la vegetazione si presenta come un medio riflettore.



Di seguito sono riportati l'istogramma, cioè la distribuzione di frequenza, dei valori di luminosità relativi a questa banda, e l'istogramma dell'immagine digitale, dove in ascissa compaiono i numeri indice, da 0 a 255, mentre in ordinata compare il numero di pixel dell'immagine che ha un certo numero indice. Si nota che l'immagine è stata trattata con la funzione di *contrast stretching*, che è una tecnica di enfattizzazione, al fine di migliorare la qualità dell'immagine e di facilitare l'interpretazione visiva.



Riflettività:

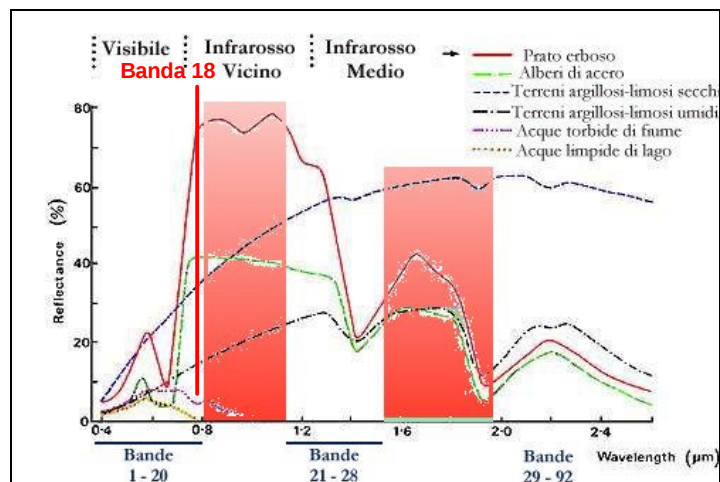


Banda 18 (0,78 μ m)

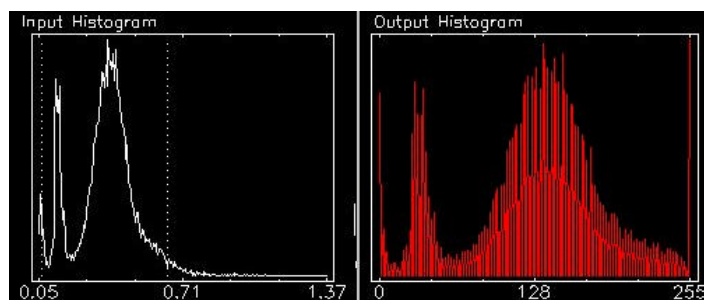


La banda 18 corrisponde alla lunghezza d'onda di 0,78 μ m e si localizza nella regione spettrale dell'Infrarosso Vicino.

In questa banda l'acqua appare totalmente scura, in quanto in questa lunghezza d'onda la radiazione è totalmente assorbita; in questo senso si riscontra un accentuato contrasto fra suolo secco e suolo umido.



Di seguito sono riportati gli istogrammi relativi ai valori di luminosità e ai valori dell'immagine digitale per la banda 18. Si tratta di un istogramma trimodale in quanto sono presenti due picchi a valori molto bassi, corrispondenti alle tonalità scure delle zone d'acqua e uno a differenti valori medi di luminosità.



Riflettività:



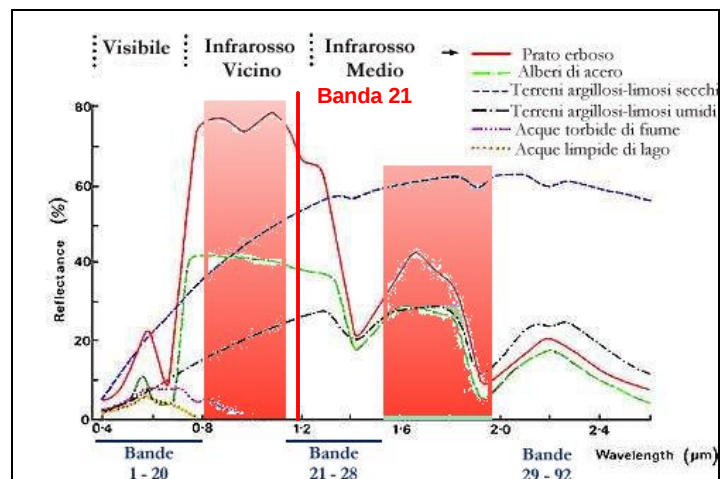
bassa

alta

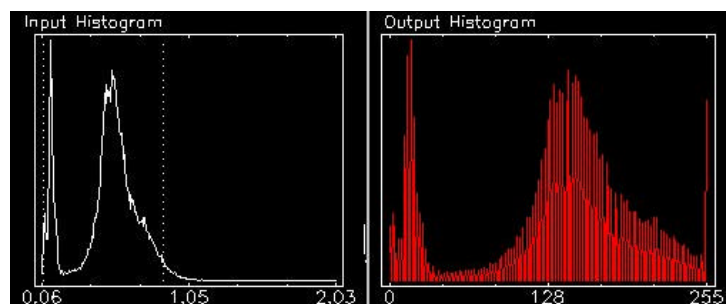
Banda 21 (1,175 μ m)



La banda 21 corrisponde alla lunghezza d'onda di 1,175 μ m e si localizza nell'estremità superiore della regione spettrale dell'infrarosso vicino. Anche questa banda è utilizzata per la caratterizzazione dei terreni e per lo studio dell'umidità dei suoli in quanto si accentuano i lineamenti già riscontrati nella banda 18 dovuti all'opacità dell'acqua in questa regione. La vegetazione appare più chiara in quanto riflette notevolmente nell'infrarosso vicino; in particolare si differenziano le superfici erbacee dalle superfici alberate a causa della riflettanza maggiore delle prime rispetto alle seconde.



Di seguito sono riportati gli istogrammi relativi ai valori di luminosità e ai valori dell'immagine digitale per la banda 21. Si tratta di un istogramma bimodale in cui è presente un picco a valori bassi, corrispondente alle tonalità scure delle zone d'acqua e uno a differenti valori medi di luminosità.



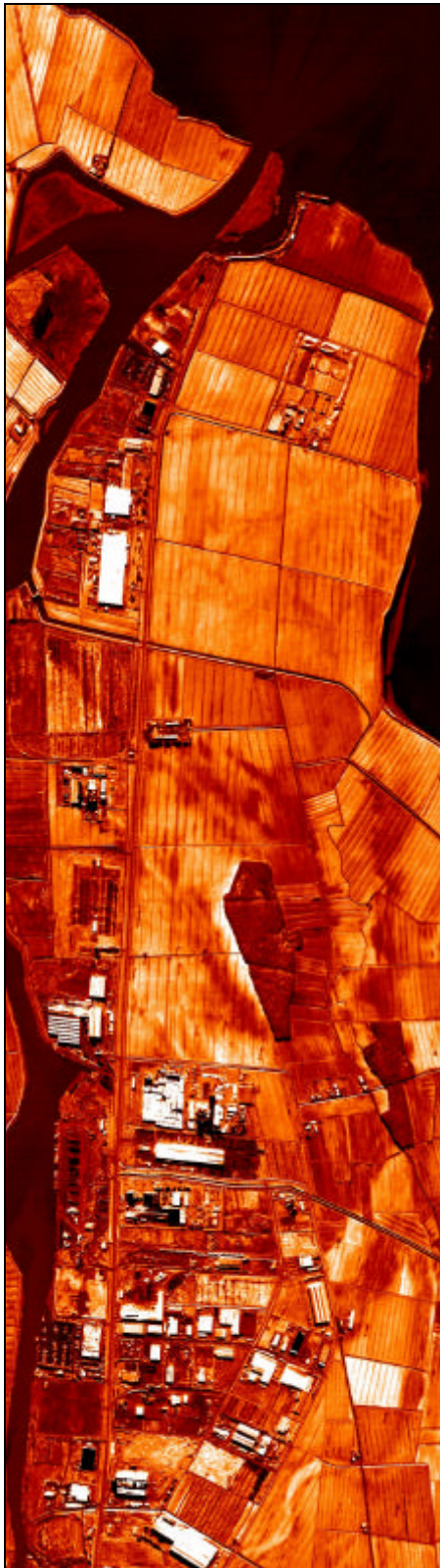
Riflettività:



bassa

alta

Banda 98 (10,44 μ m)



Riflettività:



Le bande corrispondenti all'infrarosso termico (dalla 93 alla 102 corrispondenti alle lunghezze d'onda comprese tra 8.2 e 12.7 μ m) danno informazioni correlate alla temperatura superficiale del terreno e la sensibilità del sensore in questo campo dello spettro è tale da poter apprezzare differenze dell'ordine di alcuni decimi di grado; si può ritenere in prima approssimazione che su superfici omogenee, il cui coefficiente di emissività sia praticamente costante, il valore di radianza registrato sia direttamente proporzionale alla temperatura superficiale.

La variazione di temperatura superficiale e le anomalie termiche sono indicatori molto importanti del comportamento del terreno e la loro corretta interpretazione è di particolare importanza per la comprensione dei delicati meccanismi propri delle discariche controllate e dei siti degradati. Infatti elevati livelli endotermici profondi possono dare deboli segnali in superficie a causa dello spessore di suolo entro il quale si veicolano, e possono ulteriormente essere limitate in termini di irraggiamento dalle dispersioni eoliche o dalla natura del soprassuolo. Particolare attenzione, pertanto, deve essere prestata anche alle piccole (in termini areali e radiometriche) anomalie termiche per la comprensione dei delicati meccanismi propri dei siti adibiti a discarica.

In questa regione dello spettro è inoltre possibile ottenere informazioni sulla capacità termica del terreno, cioè sulla quantità di calore che occorre somministrare ad un corpo per ottenere un innalzamento di temperatura pari a ΔT :

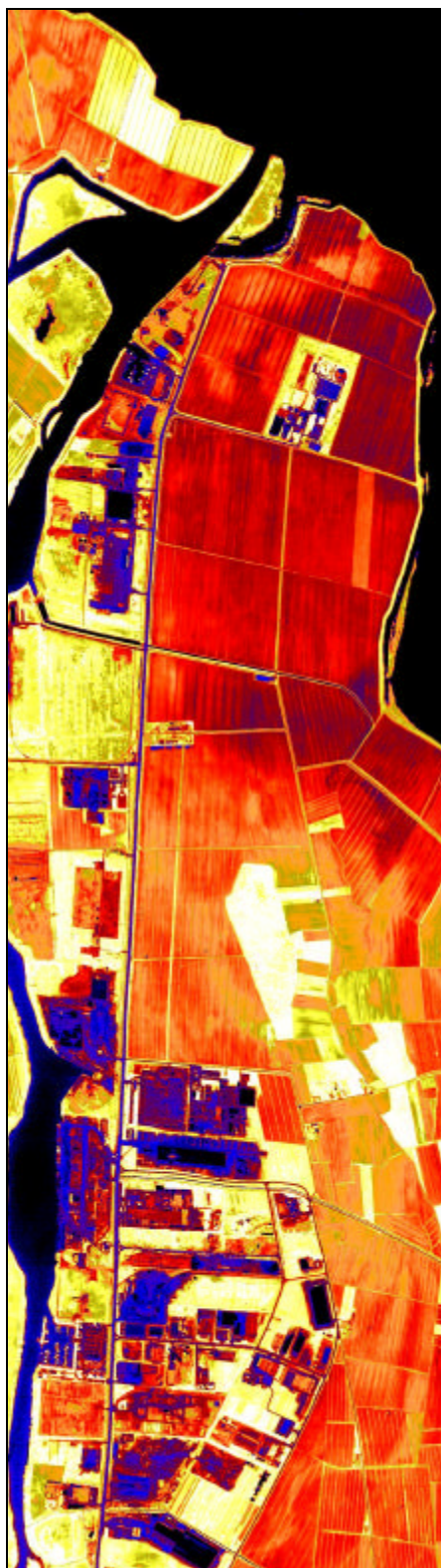
$$\text{Capacità termica} = \frac{Q}{\Delta T}$$

Nel caso delle riprese MIVIS si può ipotizzare che la quantità di calore ricevuta dal mattino fino al momento della ripresa a pieno carico solare sia costante su tutta la scena (ipotesi verosimile in quanto il calore ricevuto è dovuto unicamente al riscaldamento solare che è costante su tutta la strisciata) e quindi, stimando $\int Q$, ottenere la capacità termica dei corpi presenti nella scena.

E' importante a questo proposito dire che i processi di digestione anaerobica, in una discarica di materiale almeno parzialmente composto da sostanze organiche, conducono alla produzione di notevoli volumi di biogas (miscela di metano, anidride carbonica e idrogeno solforato). Essendo la reazione chimica di tipo esotermico, il biogas raggiunge temperature dell'ordine di 40 °C prima di disperdersi nell'atmosfera; le anomalie termiche causate dalla presenza di biogas nel terreno risultano pertanto rilevabili in immagini termiche.

INDICI DERIVATI DA RAPPORTI FRA BANDE

NDVI *Normalized Difference Vegetation Index*



NDVI:



Tra i metodi indiretti utilizzati per l'analisi di immagini telerilevate rientra quello dello studio degli indici di vegetazione in quanto la vegetazione stessa può essere vista come trasduttore delle possibili modifiche ambientali in atto. In particolare la vegetazione riflette poco nella regione del rosso (banda 13), dove assorbe l'energia per attivare il processo di fotosintesi, ed è assai brillante nell'infrarosso prossimo (riflette oltre il 50%) come si può constatare in figura 2.

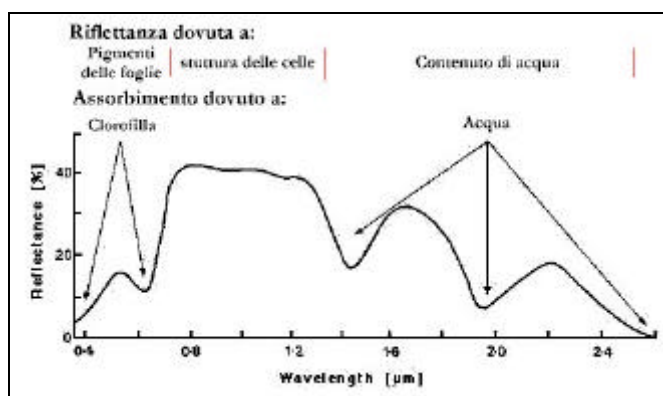


Figura 2. Lineamenti generali della firma spettrale delle vegetazione.

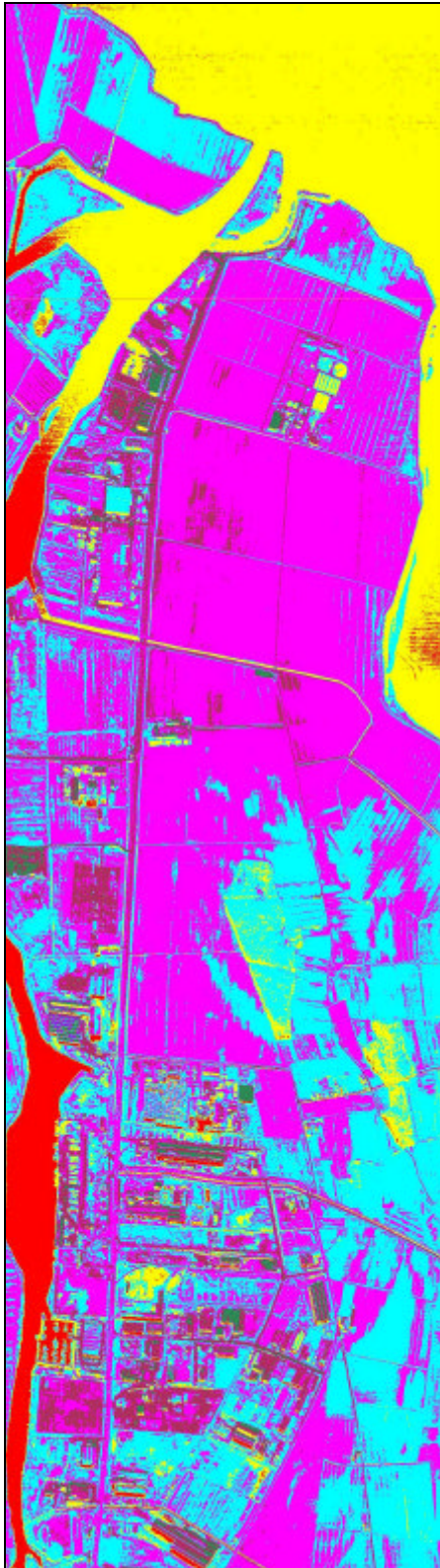
E' proprio sfruttando questa differenza di comportamento spettrale che è possibile ottenere indicazioni sulla quantità di biomassa presente, mediante lo studio di una combinazione algebrica di riflettanze nella regione del rosso e dell'infrarosso vicino, in ciascun pixel dell'immagine:

$$NDVI = \frac{\text{INFRAROSSO VICINO (B21)} - \text{ROSSO (B13)}}{\text{INFRAROSSO VICINO (B21)} + \text{ROSSO (B13)}}$$

L'immagine qui accanto è stata trattata con la tecnica del *color mapping*, che permette di associare una scala di colori ad un'immagine in scala di grigio, al fine di facilitarne l'interpretazione visiva.

4. Proposte di classificazione:

CLASSIFICAZIONE NON CONTROLLATA



La classificazione è una tecnica di raggruppamento di pixel in base ad un comportamento spettrale simile.

Si è optato in questa sezione per la tecnica di classificazione senza controlli, che prescinde cioè dalla conoscenza di aree campione del territorio in esame, e analizza lo spazio dei dati in modo da raggrupparli in un certo numero di famiglie, sfruttando unicamente i valori di radianza dei pixel, secondo una legge diversa a seconda dell'algoritmo utilizzato.

Per l'applicazione di questa tecnica si è scelto l'algoritmo basato sul criterio della minima distanza spettrale, avente lo scopo di minimizzare la varianza fra gli elementi di una classe e massimizzare la varianza fra le classi.

Dopo un'analisi preliminare di sensibilità dell'algoritmo di classificazione, si sono determinati i parametri con cui procedere alla classificazione nelle zone indagate:

bande considerate = 3,7,13,18,21,98

n° classi = 9

n° iterazioni = 5

soglia di convergenza = 98%

Si è ottenuta l'immagine qui accanto, in cui ad ogni colore corrisponde una diversa classe.



CLASSIFICAZIONE CONTROLLATA

Successivamente è stata classificata l'immagine utilizzando il metodo della *Spectral Angle Mapper* (SAM). La SAM è una tecnica di classificazione controllata che permette una rapida mappatura delle similarità di spettri di immagine con spettri di riferimento che possono essere determinati in laboratorio o in campo, ovvero estratti dall'immagine come nel nostro caso.

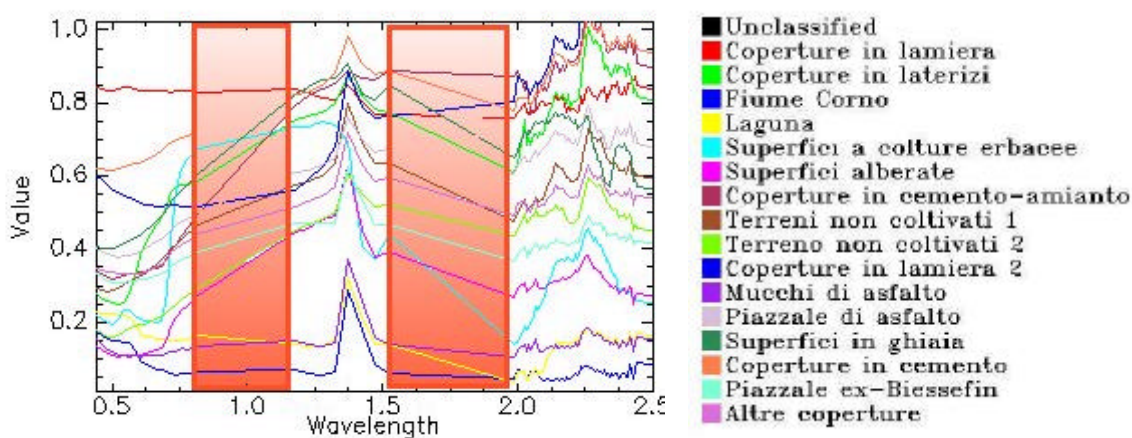
L'algoritmo determina la similarità spettrale tra gli spettri attraverso il calcolo dell'"angolo" che essi formano, trattando gli stessi come vettori in uno spazio con dimensionalità uguale al numero di bande.

L'algoritmo SAM implementato in ENVI richiede come *input* un numero di aree di prova o spettri di riferimento, derivanti da specifiche "Regioni di Interesse" (*Region Of Interest*, ROI) che, nel nostro caso, sono stati ricavati da ROI accuratamente individuate nella scena, dopo vari tentativi per cercare di differenziare fra varie coperture di edifici, tipologie di terreni, ecc. Alla fine sono state scelte aree rappresentative delle seguenti classi:

1. Coperture in lamiera.
2. Coperture in laterizi: i laterizi derivano dall'impiego di materia prima naturale, quale argilla, con aggiunta di additivi coloranti. Rappresentano il materiale di copertura più antico, attualmente utilizzato in massima parte per coperture civili.
3. Fiume Corno
4. Laguna: è una classe caratterizzata da una maggiore riflettanza dell'acqua, rispetto alla classe "Fiume Corno", dovuta ad un maggiore contenuto di sedimenti sospesi.
5. Superfici a colture erbacee
6. Superfici alberate: sono formazioni prevalentemente costituite da alberi di specie caducifoglie e sempreverdi (platani, pini, ecc.) che presentano, nel campo dell'infrarosso vicino, una riflessione ridotta rispetto alle superfici a colture erbacee.
7. Coperture in cemento - amianto, conosciuto anche come eternit, le cui limitazioni sono regolate dalla legge 257/92.
8. Terreni non coltivati¹
9. Terreni non coltivati²
10. Coperture in lamiera²
11. Mucchi di asfalto

12. Piazzale di asfalto
13. Superfici in ghiaia
14. Coperture in cemento
15. Piazzale ex-Biessefin: classe definita considerando aree del piazzale contaminato da metalli pesanti.
16. Altre coperture

Di seguito vengono riportati i profili spettrali delle classi sopra descritte.



La forma globale dello spettro è dovuta alla tipica risposta combinata solare/atmosferica, in quanto le immagini sono state fornite senza la dovuta correzione radiometrica.

Nelle zone in rosso le firme spettrali non assumono nessun significato fisico in quanto il loro andamento deriva solo da interpolazioni algebriche, non fornendo il MIVIS informazioni in queste regioni spettrali.

L'accuratezza dei risultati può essere migliorata utilizzando dati radiometricamente corretti.



Di fianco è riportata l'intera immagine classificata utilizzando l'algoritmo *Spectral Angle Mapper* e di seguito la legenda relativa alle classi utilizzate durante la procedura di classificazione.

- Unclassified
- Coperture in lamiera
- Coperture in laterizi
- Fiume Corno
- Laguna
- Superfici a colture erbacee
- Superfici alberate
- Coperture in cemento-amianto
- Terreni non coltivati 1
- Terreno non coltivati 2
- Coperture in lamiera 2
- Mucchi di asfalto
- Piazzale di asfalto
- Superfici in ghiaia
- Coperture in cemento
- Piazzale ex-Biessefin
- Altre coperture

Per maggior chiarezza, vengono riportate di seguito diverse immagini dell'intera strisciata in colori reali, con sovrapposti i pixel raggruppati all'interno delle classi.

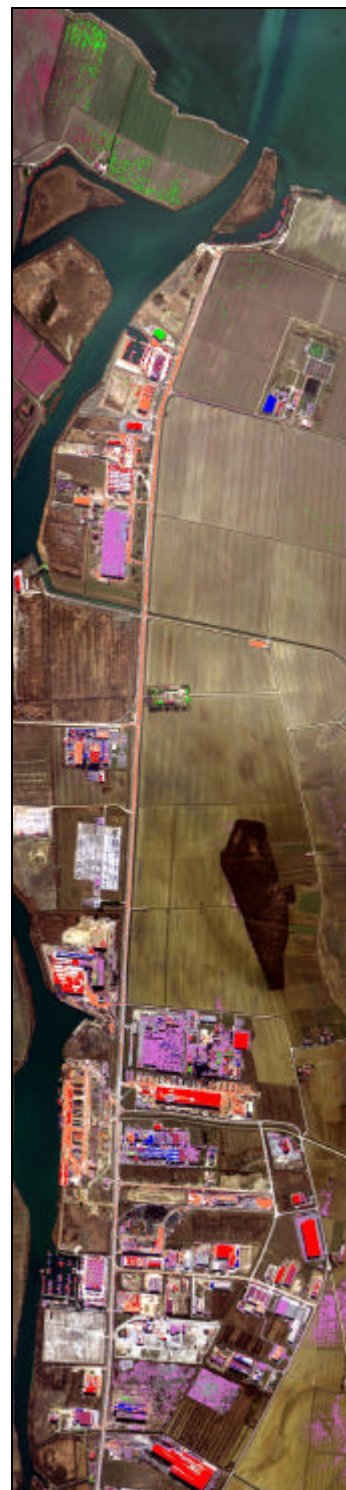
Aree vegetate: superfici a colture erbacee e superfici alberate



Terreni:



Coperture: coperture in lamiera, in laterizi, in cemento amianto, in cemento.



Acqua: fiume Corno e laguna.



Altro: mucchi di asfalto, piazzale di asfalto, piazzale ex-Biessefin, superfici in ghiaia.



5. Indagini geostatiche e analisi spaziali.



L'analisi spaziale e l'indagine geostatica sono importanti come metodo di analisi territoriale, in quanto esplorano informazioni di carattere geometrico - tessiturale che, assieme alle analisi di tipo spettrale, completano la tipologia di elaborazioni da svolgersi per esaminare aree degradate rilevate con sensori multispettrali.

Il software ENVI permette il calcolo di diverse tecniche di filtraggio: *Convolution*, *Morphological*, *Texture*, *Adaptive* e *FFT filtering*.

Il filtraggio è una tecnica di elaborazione adottata per esplorare la distribuzione, su di un'immagine, dei pixel di luminosità variabile e per individuare le discontinuità di contorno, rimuovendo alcune frequenze spaziali. Le frequenze spaziali descrivono le variazioni di intensità con la distanza e, in generale, le immagini contengono diverse frequenze spaziali.

Il *Convolution filter* è usato per filtrare l'immagine nel dominio spaziale; il *Morphological filter* per processare l'immagine in base alla forma; il *Texture filter* per estrarre informazioni riguardo la tessitura dell'immagine; il *Adaptive filter* per ridurre il rumore smussando e preservando gli spigoli acuti; il *FFT filter* per filtrare i dati nel dominio delle frequenze. Accanto è riportato un esempio di applicazione del *Texture filter* di tipo passa-alto all'immagine della banda 98.



Tale filtro studia la variazione spaziale dei toni di un'immagine come funzione di una scala. Nell'immagine vengono messi in evidenza i contorni, le strade, i corsi d'acqua, ecc., cioè quelle zone che presentano alte frequenze di variazioni di radianza. Inoltre, partendo dal principio che un terreno con una struttura caotica è potenzialmente indice della presenza di una situazione di disturbo del territorio, informazioni di tipo geometrico strutturale possono risultare utili, come si può evidenziare nell'area riprodotta nella figura sottostante dove la struttura caotica presente fa ipotizzare la presenza di un'area degradata.

6. Conclusioni

Lo studio svolto ha cercato di evidenziare la potenzialità del sistema a scansione MIVIS, sistema idoneo ad operare con elevata risoluzione spaziale, oltre che spettrale.

I risultati ottenuti permettono di valutare analogie o differenze di comportamento spettrale fra le zone indagate, andando a definire tipologie di classi utili nell'identificazione delle aree inquinate.

Tuttavia questo lavoro presuppone sviluppi futuri al fine di migliorare l'accuratezza dei risultati. In primo luogo si procederà per ottenere dati radiometricamente corretti, al fine di poter confrontare firme spettrali estrapolate dall'immagine, con firme spettrali ottenute da banche dati già raccolte in letteratura. In secondo luogo si procederà alla raccolta sul campo di dati di riferimento per poter classificare più accuratamente l'immagine con la tecnica del *Spectral Angle Mapper*.

L'utilizzo del sensore MIVIS ha consentito di fornire nuovi e più dettagliati elementi conoscitivi delle situazioni ambientali connesse alle aree degradate e/o potenzialmente degradate. Le bande e gli algoritmi utilizzati si prestano alla riproducibilità ed all'aggiornamento veloce degli studi di settore, e la natura digitale dei dati consente la facilità di elaborazione e di gestione degli stessi.

La potenzialità di questo strumento non è da sottovalutare, anche considerando il continuo sviluppo degli strumenti in ambito spaziale, che presto renderà disponibile dati di questo tipo anche da satellite.

Glossario

Accentuazione del contrasto (o *Contrast stretching*): particolare tipo di trasformazione operata sui numeri indice di un'immagine digitale per aumentare il contrasto tra gli elementi di interesse. Essa viene realizzata mediante una redistribuzione, lineare o non lineare, dei numeri indice di un intervallo dell'istogramma, fissato dall'operatore, in modo che i nuovi numeri indice occupino un intervallo più esteso. Questa classe di elaborazioni opera sul contenuto di informazione dell'istogramma, cioè sui valori di radianza, e non sulla geometria dell'immagine.

Accentuazione dei contorni (o *Edge enhancement*): trasformazione di una immagine mediante tecniche analitiche, quali ad esempio un filtro passa-alto, che enfatizzano le variazioni brusche di grigio passando da un pixel a quello vicino. Queste variazioni brusche rappresentano le informazioni ad alta frequenza spaziale dell'immagine. Tale trasformazione produce una immagine più nitida poiché le informazioni ad alta frequenza sono evidenziate dal filtro passa-alto.

Analisi delle componenti principali (*Principal components analysis*): tecnica matematica di trasformazione di un insieme di dati, spesso usata per minimizzare la ridondanza delle informazioni riducendo la dimensione dei dati. In una ripresa multispettrale le singole bande spesso sono molto correlate fra loro, cioè appaiono simili visivamente o contengono numeri indice poco diversi. Mediante questa trasformazione da un insieme di bande spettrali viene costruito un insieme di nuove variabili, dette componenti, ognuna delle quali risulta non correlata e cioè indipendente dalle altre. Le componenti costituiscono un nuovo insieme di dati rappresentabili su assi indipendenti e ortogonali, che interpolano l'insieme dei dati originali in modo che il primo

nuovo asse, prima componente principale, contiene la più grande percentuale della varianza totale dell'insieme dei dati originali.

Analisi multivariata (*Multivariate analysis*): un approccio all'analisi dei dati che fa uso di interrelazioni multidimensionali e correlazioni tra dati di tipo diverso per raggiungere una classificazione più accurata.

Anomalia: area di un'immagine che differisce dall'area circostante. Per esempio: su una termografia il termine anomalia termica indica una zona chiara o scura, causata da diverso comportamento termico di quell'area, che contrasta con il resto dell'immagine.

Assorbimento: processo fisico nel quale una radiazione che colpisce un materiale viene assorbita e trasformata in un altro tipo di energia, spesso in energia termica.

Banda spettrale: intervallo nello spettro elettromagnetico definito da due diverse lunghezze d'onda (o da due frequenze).

Bilancio energetico: Si esprime attraverso la legge di conservazione dell'energia:

$$I = A + R + T$$

cioè la somma dell'energia trasmessa, riflessa e assorbita è uguale all'energia incidente. Si può esprimere anche in forma adimensionale:

$$a + r + t = 1$$

dove a è l'assorbidività, r è la riflettività e t è la trasmissività. Il bilancio energetico è un concetto basilare per capire le diverse risposte degli oggetti nelle interazioni con la radiazione.

Capacità termica: la quantità di calore che è necessario fornire ad un corpo per innalzare la sua temperatura di un grado senza che avvengano cambiamenti di stato. Tale caratteristica dei corpi di immagazzinare calore viene utilizzata nel Telerilevamento per l'identificazione degli oggetti investigati.

Carta tematica: mappa che rappresenta su una carta di base, qualitativamente o quantitativamente fenomeni specifici che costituiscono il tema di una determinata indagine. Nell'uso convenzionale questo termine esclude le carte topografiche e geografiche.

Classe: insieme omogeneo di elementi di un sistema. Si assume che ogni elemento appartenga ad uno e ad un solo genere. L'insieme dei generi viene chiamato insieme delle "classi" o delle "categorie". Gli elementi di una scena, codificati in una o più immagini, appartengono a una data

classe se rispondono a requisiti posti dall'investigatore come condizioni necessarie perché un elemento sia considerato appartenente a quella classe. In concreto, le classi vengono definite dall'investigatore secondo le sue finalità.

Classificatore di minima distanza: algoritmo di classificazione con cui ogni pixel non conosciuto con vettore caratteristica X , viene classificato assegnandolo a quella classe il cui vettore valore medio, M è più vicino a X . La vicinanza o lontananza del vettore M dal vettore X viene misurata in base alla particolare definizione di distanza scelta per la classificazione.

Classificazione guidata o controllata (*Supervised classification*): tipo di classificazione automatica che consiste nella suddivisione a posteriori dei pixel conosciuti in un determinato numero di classi o categorie, sfruttando le caratteristiche ricavate da insiemi campione. Il processo di classificazione guidata si può così schematizzare: - determinazione del numero delle classi o categorie di interesse - scelta degli insiemi campione (zone di addestramento) e degli insiemi di controllo o test - scelta delle caratteristiche, o parametri da misurare - scelta della regola di decisione - assegnazione degli elementi della scena a una classe o all'altra - valutazione dell'accuratezza dei risultati sulle zone test predefinite.

Corpo nero: superficie ideale, postulata dalla fisica classica, che ad una data temperatura irraggia il massimo di energia per unità di area e per ogni lunghezza d'onda e che può assorbire tutta la radiazione che incide su di esso. Il suo comportamento è descritto dalla legge della radiazione di Plank.

Correzione geometrica: procedura di correzione effettuata sui dati di una immagine o per eliminare gli errori di geometria prodottisi nella fase di ripresa a causa dell'assetto della piattaforma, del tipo di sensore, della morfologia della scena, o comunque per variare le sue caratteristiche geometriche. Viene applicata al fine di migliorare la coerenza geometrica di una immagine nel caso che debba essere utilizzata a scopi cartografici oppure debba essere messa a registro con altri dati.

Correzione radiometrica: procedura di calibrazione e correzione delle variazioni del fattore di amplificazione e di offset dovute alla degradazione della risposta di un sensore alla radiazione incidente, eseguita sui dati bruti per convertirli in un insieme di misurazioni radiometriche coerenti.

Dati corretti: sono i dati bruti dopo la fase di correzione radiometrica e geometrica. I dati corretti vengono distribuiti agli utenti per le successive fasi di analisi, trattamento e interpretazione.

Dati di riferimento a terra: dati raccolti con campagne di misure eseguite a terra sulla zona della scena in esame per avere informazioni sulle caratteristiche delle superfici. Tali dati servono come supporto per l'interpretazione di quelli telerilevati. Rientrano in tale categoria anche i dati ricavati dalla documentazione cartografica esistente oltre alle misure radiometriche prese a distanze diverse: da qualche metro fino ad alcune centinaia di metri con un volo a bassa quota.

Dati di taratura (*Calibration data*): misure ottenute mediante l'uso di sorgenti fisse di energia o di modelli geometrici standard per studiare le caratteristiche spettrali o geometriche di sensori o sorgenti di radiazioni. Rientrano nel più generale termine di effemeridi.

Filtro spaziale: operatore matematico monadico che trasforma un'immagine per attenuarne il disturbo o per evidenziarne certe caratteristiche. Ogni pixel di coordinate x,y viene trasformato dal filtro spaziale in un pixel con un valore indice di radianza calcolato in funzione di un particolare modello spaziale e dei pixel vicini alle coordinate x,y .

Firma spettrale: insieme di misurazioni quantitative, in una o più bande spettrali, necessarie e sufficienti a identificare una superficie o un oggetto. Tra le più comuni caratteristiche misurate per determinare la firma spettrale dei soggetti presenti nella scena sono l'emissione, la riflessione e la polarizzazione.

Larghezza della strisciata: dimensione lineare a terra, misurata nella direzione trasversale alla linea di volo, della striscia di terreno coperta durante una scansione dallo strumento di ripresa sulla piattaforma. È determinata dalla somma dei campi istantanei di vista che formano il campo di vista.

Linea di scansione: la striscia a terra rilevata mediante spostamento del campo istantaneo di vista del sensore di un sistema a scansione. Tale spostamento avviene trasversalmente rispetto alla linea di volo della piattaforma e permette l'esplorazione sequenziale di una scena linea per linea.

Multispettrale: termine che indica una delle caratteristiche precipue delle tecniche di Telerilevamento e che si riferisce alla capacità dei sistemi di elaborazione e dei sistemi di ripresa, fotografici o a scansione, di raccogliere la radiazione proveniente dalla scena contemporaneamente in più bande spettrali. La radiazione, utilizzando un sistema di filtri e di sensori diversi, viene suddivisa in intervalli più o meno larghi dello spettro elettromagnetico centrati su lunghezze d'onda che normalmente vanno dall'ultravioletto alle microonde.

Ortofotocarta: Assemblaggio di ortofotografie (immagini fotografiche con le stesse proprietà di una proiezione ortogonale e che sono ottenute da una camera metrica e sulla quale le deformazioni

dovute all'inclinazione dell'asse di ripresa e/o al rilievo del terreno sono state corrette mediante raddrizzamento semplice o raddrizzamento differenziale) da riprese aeree o da satellite, portate alla stessa scala, fatte combaciare e ritagliate in modo che le linee di raccordo permettano di ottenere la continuità ottimale della rappresentazione di una parte della superficie terrestre e con l'aggiunta delle indicazioni, quali toponimi, altimetria, legenda ecc., che gli conferiscono il carattere di una carta o mappa.

Pixel: termine derivato dalla fusione dei termini inglesi '*picture element*'. Data un'immagine digitale si dice pixel ognuna delle superfici elementari che la costituiscono. Ogni pixel corrisponde a una cella di risoluzione a terra le cui dimensioni sono delimitate dalle caratteristiche dello strumento che riprende la scena. Rappresentare o misurare una scena con un insieme di pixels - immagine digitale - costituisce una forzatura poiché si sostituisce una visione discreta a una visione analogica della realtà. Tanto più piccola è la cella di risoluzione a terra corrispondente al pixel, maggiori sono i dettagli conservati nella rappresentazione digitale, ma tanto più grande sarà il numero di pixels necessari a questa rappresentazione. Ai vantaggi della grande quantità di informazioni si oppongono gli svantaggi per dover elaborare una grande massa di dati.

Radiazione: energia emessa o propagata attraverso un mezzo materiale o attraverso lo spazio vuoto sotto forma di onde. Si hanno, per esempio, le onde elettromagnetiche o fotoni, le onde corpuscolari o raggi α e β , le onde sonore ed elastiche.

Radiazione elettromagnetica: energia che si propaga alla velocità della luce sotto forma d'onde vettoriali trasversali attraverso lo spazio o mezzi materiali con i quali interagisce, eventualmente trasformandosi in altra forma di energia. Il vettore campo elettrico e il vettore campo magnetico che la costituiscono vibrano perpendicolarmente tra loro e in un piano perpendicolare alla direzione di propagazione della radiazione stessa. La radiazione elettromagnetica può essere descritta in forma ondulatoria o in forma corpuscolare secondo la lunghezza d'onda e secondo il tipo di interazione con cui si rivela. Caratteristiche della radiazione elettromagnetica sono: la direzione di propagazione, le diverse bande spettrali, l'intensità in ogni banda, la polarizzazione, la fase, la frequenza, l'ampiezza.

Rapporto segnale-rumore: rapporto fra la potenza del segnale che porta l'informazione e la potenza del rumore.

Raster: modello predeterminato di linee a scansione che garantisce una copertura uniforme di un'area. L'informazione numerica è organizzata sotto forma di matrice ordinata per righe e colonne.

Risoluzione: nel caso di un sistema di ripresa o di misura indica genericamente la capacità del sistema di distinguere due punti vicini di una immagine oppure due livelli di un fenomeno. Per un sistema la risoluzione viene precisata mediante il potere risolvante o il limite di risoluzione spaziale, essendo uno l'inverso dell'altro.

Risposta spettrale: la risposta di un materiale come funzione della lunghezza d'onda dell'energia elettromagnetica incidente, particolarmente in termini di energia misurabile emessa o riflessa.

Rollio: per una piattaforma si definisce un sistema di riferimento tridimensionale con origine nella piattaforma stessa e i cui assi sono: la verticale (z), la tangente alla traiettoria (x) e un terzo asse perpendicolare ai primi due (y). Il rollio è la velocità angolare intorno all'asse X e l'angolo di rotazione corrispondente, misurato nel piano Y, si chiama assetto.

Rumore: disturbo o perturbazione che interferisce regolarmente o casualmente provocando un degrado nella qualità dell'informazione.

Scala di grigi: serie calibrata, discreta o continua, di toni grigi che vanno dal bianco al nero. Può servire a controllare la riproduzione di un cliché fotografico oppure a valutare la quantità di radiazione raccolta su una immagine.

Scansione: metodo di esplorazione di una scena o di un'immagine effettuato mediante l'acquisizione di dati lungo linee adiacenti e parallele tra loro, grazie alla rotazione o oscillazione di uno specchio trasversalmente alla linea di avanzamento dello strumento di ripresa.

Sensore: qualsiasi dispositivo che raccoglie l'energia elettromagnetica proveniente dalla scena e la converte in un segnale elettrico che porta informazioni relative alla scena stessa. Sotto questo termine, per assimilazione, viene anche designata la camera fotografica

Sensore a scansione: sensore che effettua l'esplorazione della scena mediante strisce successive trasversali alla direzione di spostamento determinate dal movimento oscillatorio dello strumento.

Sistema passivo di rilevamento: sistema di rilevamento che risponde alle variazioni di radiazioni elettromagnetiche che vengono naturalmente riflesse o emesse dalle diverse superfici. Quando si rileva l'energia riflessa, la sorgente di questa energia è il sole; quando si rileva l'energia emessa, la sorgente di questa energia è la superficie stessa in funzione del suo stato termico (temperatura maggiore di zero Kelvin).

Sintesi additiva: metodo per la riproduzione di un qualsiasi colore mediante la somma, in proporzione conveniente, dei tre colori primari additivi, blu, verde e rosso, utilizzando tre sorgenti

di luce. In pratica si realizza con tre proiettori davanti ai quali viene posto rispettivamente un filtro blu, uno verde e uno rosso; ognuno di essi assorbe le altre due luci primarie e trasmette circa $1/3$ dell'energia luminosa della sorgente. Nel punto in cui i tre fasci di luce si sovrappongono l'effetto visivo è la percezione del bianco, poiché tutti e tre i sistemi ricettori dell'occhio umano sono stimolati in uguale misura. La luce bianca quindi può essere pensata come mescolanza di blu, verde e rosso: Bianco = blu + verde + rosso ciano = blu + verde magenta = blu + rosso giallo = verde + rosso

Telerilevamento: insieme di tecniche, strumenti e mezzi interpretativi che permettono l'acquisizione a distanza di informazioni qualitative e quantitative su fenomeni o oggetti, senza entrare in contatto con essi.

Varianza: in statistica la varianza di una variabile casuale è il valor medio, o valore di aspettazione, calcolato sui quadrati degli scostamenti dei valori della variabile rispetto al suo valor medio. È una misura della dispersione dei singoli valori assunti dalla variabile casuale attorno al loro valor medio.

Bibliografia

Marino C. M., Del Piero G., Longo M., Panigada C. (2000) - *Analisi Multitemporale di un sito adibito a discarica di R.S.U.* - Atti della 4^a Conferenza Nazionale ASITA - Genova, 3-6 Ottobre - Volume 2, pp. 1057-1058.

Gomarasca M.A., Strobelt S. (1995) - *Integrazione di dati TM e MIVIS per l'individuazione di discariche* - Atti del VII Convegno Nazionale AIT, Chieti (TO) 17-20 Ottobre 1995, pp.235-240.

Mario A. Gomarasca (1977) - *Introduzione a telerilevamento e gis per la gestione delle risorse agricole e ambientali.* - Associazione Italiana di Telerilevamento.

Tonelli A. M. (1998) - *Complementi di Telerilevamento* - Luni Editrice

G. Del Pero, P. Ferroni, C. M. Marino, M. Ronzoni - *Utilizzo dello scanner iperspettrale MIVIS per il monitoraggio di ambiti di discarica*- Atti del VII Convegno Nazionale AIT, Chieti (TO) 17-20 Ottobre 1995, pp.241-246.

R. Bianchi, R. M. Cavalli, C. M. Marino, S. Pignatti - *MIVIS airborne hyperspectral Remote Sensing in Europe* - <http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/ISSSR-95/mivisair.htm>

Lechi G.M. (1999) - *Dispense del corso di telerilevamento* - Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Milano

Glossario di Telerilevamento: <http://www.planetek.it/corsotlr/>

Consorzio per lo Sviluppo Industriale della Zona dell'Aussa-Corno (2000) - *Piano della Caratterizzazione.*

Sito industriale di Torviscosa: <http://www.snia.it/site/profilo/torviscosa.html>

E. Zilioli, P.A. Brivio, L.Colombo, M.A. Gomasasca, G.M. Lechi (1994) - *Applicazioni e prospettive del telerilevamento nel censimento e nel monitoraggio dei siti di discarica*. - Rivista Italiana di Telerilevamento.

L. Fiumi, A. P. Leone (1999) - *Il dato MIVIS per la mappatura delle superfici in cemento amianto, un caso di studio: Bagnoli (NA)* - Atti della 3° conferenza Nazionale Asita - Napoli, 9-12 Novembre 1999 - Volume II, pp 747-751.