

CAPITOLO TERZO

**IL TELERILEVAMENTO PER LO STUDIO
DEI SISTEMI A MAREA****§3.1 Principi generali del telerilevamento**

Il controllo periodico della vegetazione di barena attraverso analisi in campo delle specie vegetali e della loro distribuzione è un compito gravoso per l'estensione delle superfici (decine di km²) e per la difficoltà di accedere ai siti. D'altra parte i dinamismi che caratterizzano la morfologia dei suoli di barena e la fisiologia delle piante insediate richiedono ispezioni frequenti che solo i più recenti strumenti di misura installati su piattaforme aeree e satellitari permettono di realizzare. Per questo motivo negli ultimi anni l'impiego del telerilevamento è diventato sempre più frequente nel monitoraggio dell'area lagunare, in quanto consente di effettuare un campionamento spaziale sistematico e garantisce la necessaria sinotticità di monitoraggio. Inoltre studi recenti hanno mostrato che il telerilevamento è una tecnica molto efficace per il riconoscimento delle differenti specie vegetali presenti in barena perché esibiscono tipiche e distinte firme spettrali (Cibien, 2000; Silvestri et al., 2002).

Il telerilevamento opera con sensori che captano la radiazione elettromagnetica e la convertono in segnali elettrici interpretabili: i sensori passivi misurano la radiazione solare riflessa dagli oggetti presenti al suolo, mentre quelli attivi agiscono con una propria sorgente di segnale la cui intensità di ritorno dopo l'impatto con l'oggetto al suolo viene misurata da un detector a bordo della medesima piattaforma o di altra piattaforma remota.

L'energia elettromagnetica emessa o riflessa da ciascun elemento di superficie forma un'immagine i cui elementi (*pixel*) sono caratterizzati da valori discreti della riflettanza che vengono codificati in binario. Il vantaggio della codifica binaria consiste nella necessità di processarle i dati acquisiti mediante calcolatori e nella maggior sicurezza di trasmissione.

La scelta dei sensori per condurre le campagne di telerilevamento previste dal progetto TIDE è stata effettuata considerando le caratteristiche spettrali del bersaglio, le scale spaziali che caratterizzano il fenomeno di indagine, e la sua variabilità temporale: i sensori più adatti al monitoraggio delle variabili legate all'ambiente di barena sono risultati essere due sensori aerotrasportati (MIVIS e CASI) e un sensore satellitare (QuickBird), del quale ci si occupa in dettaglio in questo lavoro.

§3.2 L'immagine QuickBird

Il QuickBird è il satellite commerciale a più alta risoluzione spaziale attualmente operativo per usi commerciali. Il 18 dicembre 2001 la Digital Globe ha provveduto con successo al lancio del satellite QuickBird (il precedente Early Bird era andato perduto alcuni mesi prima in fase di lancio), che consente riprese della superficie terrestre alla risoluzione di circa 60cm al nadir.

L'immagine utilizzata nel presente lavoro è stata acquisita in data 16 maggio 2002 per conto dell'unità TIDE che opera presso il Dipartimento di Scienze Ambientali dell'Università Ca' Foscari di Venezia, ed è stata fornita dalla società Telespazio, concessionaria dei prodotti Digital Globe in Italia.

Nella fig.3.1 è indicata la localizzazione del poligono dell'area di studio del quale è stata acquisita l'immagine QuickBird il 16 maggio 2002; alla data presente sono stati effettuati gli ordini per altre tre immagini nel 2003 e sono in progetto due ordini nel 2004. L'area del poligono è di 64km² (ampiezza minima per una fornitura QuickBird) e le coordinate Gauss Boaga fuso Est (Roma 40) dei vertici sono le seguenti:

- Vertice N.1: 2312341,05 5043224,33
- Vertice N.2: 2316514,17 5046008,00
- Vertice N.3: 2321517,42 5046614,12
- Vertice N.4: 2326161,70 5044683,51
- Vertice N.5: 2322055,89 5038263,10

I lati del poligono rispondono ai requisiti richiesti dal fornitore di superare i 5 km di lunghezza e la scena comprende i siti di indagine relativi alle barene di San Felice, Saline, Palude Maggiore e Pagliaga.



Fig.3.1 - Rappresentazione del poligono di acquisizione dell'immagine sulla laguna di Venezia

Il sensore QuickBird presenta alcune caratteristiche che lo rendono adatto allo studio della vegetazione, in particolare la sue elevate risoluzioni spaziale e radiometrica e la notevole frequenza con cui è possibile acquisire riprese successive della stessa area.

§3.2.1 Risoluzione geometrica

Ogni sensore è caratterizzato da una risoluzione spaziale, che rappresenta l'area al suolo corrispondente alla dimensione del *pixel* sull'immagine digitale e che viene definita in base alla geometria tra il sensore e l'obiettivo nella fase di misurazione. Il sensore rileva l'energia proveniente dall'area compresa nell'angolo solido sotteso e

fornisce il valore registrato per ogni unità elementare dell'immagine. Questa unità di superficie al suolo viene indicata con la sigla IFOV (*Instantaneous Field of View*) ed è una funzione dell'altezza H del sensore, della dimensione D del detector e della lunghezza focale f del sistema ottico impiegato (Kramer, 1996).

L'IFOV può essere espresso come angolo o direttamente come lunghezza:

$$\begin{array}{ll} \text{in radianti} & IFOV_{\alpha} = D/f \\ \text{in metri} & IFOV_L = HD/f \end{array}$$

dove α è l'angolo solido sotteso ed L esprime la dimensione del lato del *pixel* al suolo.

L'apertura angolare complessiva entro la quale il sensore acquisisce il segnale è il campo di vista (*Field of View*, FOV) e individua l'ampiezza massima della scena di osservazione nella direzione perpendicolare alla rotta di volo.

In fig.3.2 è illustrato uno schema semplificato dell'acquisizione del segnale da parte del detector.

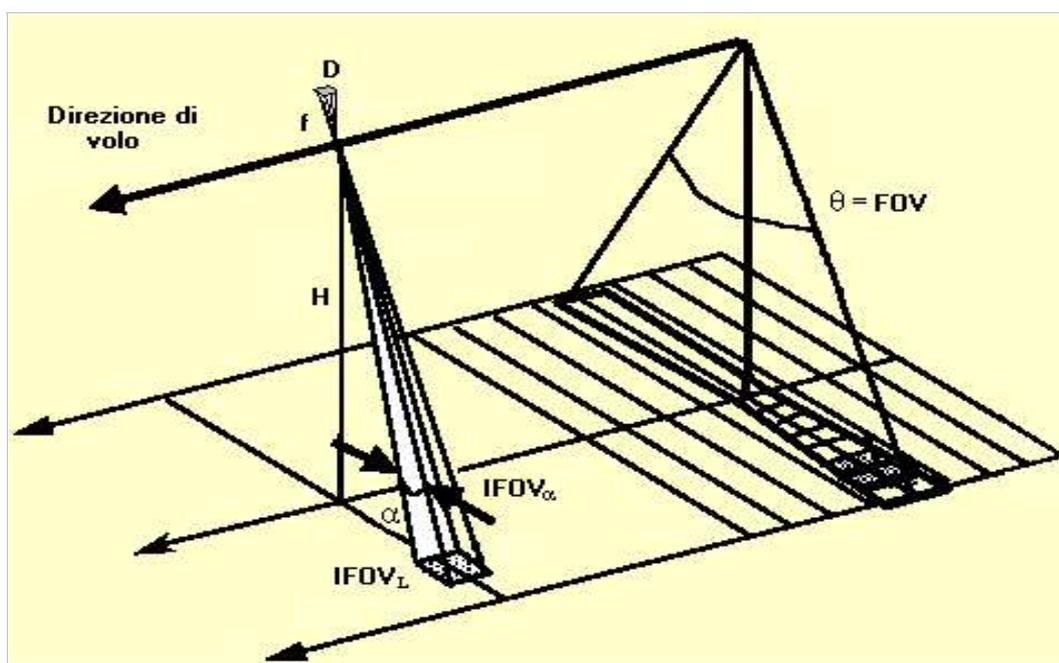


Fig.3.2 - Relazione tra i parametri che definiscono l'IFOV (mod.da Philpot, 2002).

Per ottenere un'elevata risoluzione spaziale, l'IFOV dovrebbe essere molto piccolo: il limite è stabilito dalla quantità di energia in arrivo al sensore che, provenendo da una superficie al suolo piuttosto ridotta, condiziona la capacità del sensore di rilevare un segnale sufficientemente distinto dal rumore di fondo.

La risoluzione geometrica dei due sensori aerotrasportati MIVIS e CASI impiegati nell'ambito del progetto TIDE è pari rispettivamente a 2,4m e 1,3m, mentre il sensore QuickBird consente di raggiungere valori pari a 70cm nel pancromatico e 2,8m nel multispettrale. Quest'ultimo si rivela quindi particolarmente indicato sia per l'individuazione delle principali strutture morfologiche del territorio, come la fitta rete di ghebi e canali che solcano il territorio, che hanno larghezza compresa tra qualche decimetro e qualche metro, sia per il riconoscimento delle aree di vegetazione di barena. La copertura vegetale del suolo presenta infatti un'elevata variabilità spaziale: l'estensione delle aree omogenee varia da pochi metri quadrati ad una decina di metri quadrati al massimo e inoltre i confini tra le macchie di vegetazione sono piuttosto netti, dando luogo ad un mosaico di popolamenti a tasselli contigui.

§3.2.2 Risoluzione radiometrica

La risoluzione radiometrica misura la capacità del sistema di rilevare variazioni di radianza nella scena osservata. Il segnale in uscita dal detector deriva dalla trasformazione di un segnale ottico analogico in un segnale elettrico digitale che associa un numero binario ad un livello (o tono) di grigio. La risoluzione radiometrica esprime quindi il numero di livelli di grigio (range dinamico) impiegati per rappresentare i dati raccolti dal sensore. In generale, i sistemi di rilevamento sono progettati in modo da registrare il maggior numero possibile di livelli di segnale per ridurre al minimo la perdita di informazione relativa alla scena osservata, ma il limite superiore del range dinamico dello strumento è definito dal rapporto segnale/rumore.

L'immagine QuickBird acquisita è stata fornita in modalità 16-bit, quindi l'intensità dell'energia in arrivo al detector è suddivisa in intervalli di luminosità discreti che vengono convertiti in 2^{16} (=65536) livelli di grigio.

§3.2.3 Risoluzione spettrale

La risoluzione spettrale di un sensore è determinata dall'ampiezza di banda (intervallo di lunghezze d'onda) che lo strumento riesce a discriminare. Esistono due tipi fondamentali di sensori remoti: i multispettrali, che registrano l'immagine in un limitato numero di bande spettrali distinte (di norma in numero inferiore a dieci), spesso ampie e non sempre contigue, e gli iperspettrali, che acquisiscono il segnale in numerosi intervalli di lunghezze d'onda molto stretti e ravvicinati, e che quindi consentono di

ottenere una risposta spettrale dettagliata dei diversi oggetti investigati. Per fornire un'accurata identificazione degli obiettivi presenti al suolo la risoluzione spettrale del sensore deve essere confrontabile il più possibile con la curva di riflettanza dell'oggetto (firma spettrale). Il limite dei sistemi ad alta risoluzione è stabilito dal basso rapporto segnale/rumore in quanto la potenza raccolta dal sensore, a parità di radianza al suolo, è proporzionale all'ampiezza dell'intervallo di lunghezze d'onda in cui il segnale viene registrato (Brivio et al., 1992). Questo problema può in parte essere compensato allungando i tempi di esposizione durante l'acquisizione dell'immagine.

La porzione dello spettro magnetico riconosciuta più utile per lo studio della vegetazione comprende il visibile e il vicino infrarosso, infatti la risposta spettrale tipica della vegetazione mostra un picco di riflettanza caratteristico nel verde, un ripido margine verso il plateau dell'infrarosso ed un picco di assorbimento della clorofilla nel blu e nel rosso¹. Le firme spettrali della vegetazione sono in genere piuttosto simili tra loro: esse differiscono solo per gli effetti collegati alla vitalità delle piante, soprattutto in termini di spostamento e cambiamento di pendenza del picco nel rosso (Bodechtel, 2001).

I due sensori iperspettrali aerotrasportati usati nel progetto TIDE sono il MIVIS (*Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer*), che acquisisce il segnale in 92 bande del visibile e vicino infrarosso e in 10 bande dell'infrarosso termico, e il CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*), il cui numero di bande e relativa ampiezza spettrale possono essere programmati in funzione delle esigenze dell'utente: per l'individuazione della risposta spettrale della vegetazione sono state scelte 15 bande del visibile e del vicino infrarosso. L'immagine satellitare QuickBird acquisita è stata invece fornita in due modalità: multispettrale e pancromatica.

L'immagine multispettrale è registrata in quattro bande, in parte sovrapposte, nei canali del blu, del verde, del rosso e dell'infrarosso vicino, e consente quindi di tracciare la risposta spettrale degli elementi presenti al suolo, mentre la pancromatica integra il segnale ricevuto in un'unica ampia banda di 140nm. La risoluzione spettrale in questo caso è quindi piuttosto bassa, ma ciò consente di ottimizzare la risoluzione spaziale del sensore, che riesce a rilevare il segnale proveniente da una superficie al suolo di soli 70cm di lato. In tab.III.I vengono riportati gli intervalli spettrali delle 5 bande del sensore QuickBird:

¹ La porzione di energia riflessa nel campo del visibile è correlata alla presenza di pigmenti fogliari quali clorofilla, xantofilla e carotene. L'epidermide e i pigmenti sono molto trasparenti all'infrarosso, consentendo quindi a tale radiazione di raggiungere il parenchima; le componenti verde e gialla del visibile vengono invece fortemente riflesse dal mesofillo, fuoriuscendo dalla foglia e conferendole la tipica colorazione verde (Gomasca, 1997).

BANDA	lim.inf. (nm)	lim.sup (nm)	ampiezza (nm)
Pancromatico	450	900	450
MS1: blu	450	520	70
MS2: verde	520	600	80
MS3: rosso	630	690	60
MS4: vicino infrarosso	760	900	140

Tab.III.1 - Intervalli di ampiezza spettrale delle bande QuickBird.

§3.2.4 Risoluzione temporale

Dal punto di vista temporale, ogni campionamento si caratterizza per la durata del prelievo e per la frequenza con la quale si ripete. Nel caso dei sensori remoti, la durata dell'osservazione è condizionata dalle caratteristiche del sistema di osservazione (tempo di esposizione) ed è generalmente trascurabile nei confronti dei tempi di evoluzione dei fenomeni di indagine. Lo studio di ambienti dinamici come quelli oggetto di questo lavoro, invece, richiede che il tempo impiegato per acquisire i dati sull'intero territorio sotto osservazione sia molto breve, all'incirca dell'ordine delle decine di minuti: in questo modo infatti si limitano gli effetti dovuti alle variazioni di quota dell'acqua dovuti alle maree. Infatti esiste un'elevata variabilità temporale delle condizioni di umidità del suolo, che in base alla marea può risultare emerso o completamente sommerso da uno strato d'acqua di diversi centimetri, e questa circostanza può influenzare notevolmente la risposta del sensore. Per quanto riguarda la risoluzione temporale del satellite impiegato, questo fattore è del tutto trascurabile perché la tecnologia del sensore QuickBird consente di acquisire in circa 4 secondi un'immagine di 16,5km x 16,5km.

La frequenza con la quale si ripetono i rilievi è condizionata da molti fattori tra cui spesso domina quello economico. In ogni caso le caratteristiche temporali che si possono risolvere dipendono dalla frequenza dei campionamenti. Il progetto TIDE ha programmato regolari sorvoli dell'area lagunare ogni tre mesi circa per monitorare lo sviluppo della vegetazione e l'evoluzione morfologica su scale temporali più vaste². In particolare, il sensore QuickBird sorvola la Terra a 450km di distanza, percorrendo un'orbita eliosincrona di 98°, e garantendo quindi una frequente rivisitazione della stessa zona ad intervalli di tempo costanti durante l'anno: questa caratteristica rende

² In programma c'è anche almeno un breve periodo di frequenti sorvoli che serviranno per acquisire informazioni sugli effetti di intensi e isolati fenomeni come mareggiate, vento e particolari condizioni meteorologiche da introdurre come condizioni al contorno nell'elaborazione dei modelli di evoluzione.

possibile monitorare l'evoluzione della vegetazione di barena in un periodo che copre diverse stagioni e diversi anni.

§3.3 Il *preprocessing* dell'immagine

Prima di essere utilizzati per l'interpretazione, i dati raccolti da sensori remoti necessitano di una fase, detta di preelaborazione, in cui si cercano di correggere gli errori, il rumore e le distorsioni introdotti durante l'acquisizione dell'immagine, in modo da ottenere una fedele rappresentazione della scena osservata.

Nel *preprocessing* delle immagini telerilevate, le operazioni fondamentali, soprattutto al fine di confrontare i risultati delle successive elaborazioni nel tempo o con immagini acquisite da altri sensori, sono la correzione radiometrica, atmosferica e geometrica.

§3.3.1 La correzione radiometrica

Le correzioni radiometriche servono per eliminare due cause di errore:

- il cattivo funzionamento dei sensori;
- l'influenza dello strato di atmosfera interposto tra il sensore e la scena investigata.

L'aggiunta di radiazione dovuta alla diffusione di energia radiante da parte dell'atmosfera diminuisce il contrasto delle immagini rilevate, e deve quindi essere eliminata; tale correzione è però compresa nella procedura di correzione atmosferica e quindi può essere in questa fase trascurata.

Per quanto riguarda la prima causa di disturbo, l'immagine utilizzata nel presente studio è stata fornita corretta radiometricamente in termini di risposta radiometrica relativa tra i canali: mediante l'equalizzazione della risposta del sensore si è quindi già ottenuta la compensazione per la distorsione ottica e di scansione della scena, che dipende dalla geometria interna del detector. Per ottenere l'effettiva risposta del sensore, invece, è stato necessario richiedere alla ditta fornitrice dell'immagine i fattori di conversione per trasformare i *digital numbers* (DN) nei valori di radianza assoluta della scena.

Per il set di bande spettrali dalla 1 alla 4 e per la banda pancromatica del QuickBird la calibrazione radiometrica ha permesso di ottenere valori di radianza in $W/m^2 sr nm$ utilizzando la seguente formula:

$$L = K \cdot q$$

dove L è la radianza in W/m^2sr , K è un valore correttivo in $W/m^2sr DN$ (tab.II), e q rappresenta la matrice dei DN forniti dai detectors radiometricamente corretti.

BANDA	K ($W/m^2 sr DN$)
Pancromatica	0,06269
MS1: blu	0,01431
MS2: verde	0,01045
MS3: rosso	0,00968
MS4: vicino infrarosso	0,01568

Tab.II - Fattori di correzione K forniti dalla ditta Telespazio

Per ottenere la radianza spettrale assoluta in $W/m^2sr nm$ è stato poi necessario dividere il dato ottenuto per l'ampiezza nominale della banda corrispondente (v.tab.I).

§3.3.2 La correzione atmosferica

Non tutta la radiazione solare riflessa dalla superficie della Terra raggiunge i sensori montati su piattaforme satellitari o aeree (in media solo l'80% a $0,85 \mu m$ e il 50% a $0,45 \mu m$) perchè l'atmosfera funziona da filtro selettivo alle diverse lunghezze d'onda ed i fotoni mancanti vengono persi nei processi di *assorbimento* e *scattering*.

Per correggere le distorsioni atmosferiche che disturbano i dati rilevati dal sensore QuickBird si è scelto di utilizzare il modello 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*), codice sviluppato in Fortran che simula il comportamento dell'atmosfera nel trasferimento della radiazione solare dello spettro visibile ed infrarosso (Vermote et al., 1997).

Il 6S ricava un'espressione analitica della riflettanza atmosferica misurata da un sensore posizionato sia su piattaforma satellitare sia su piattaforma aerea e calcola la correzione del segnale per i principali effetti dovuti alla presenza di ozono, acqua, ossigeno molecolare, anidride carbonica e monossido di azoto distinguendo quattro diverse componenti (Cibien, 2000):

- la componente atmosferica³, che comprende i fotoni in arrivo al sensore senza avere raggiunto la superficie terrestre e sono diffusi dall'atmosfera all'indietro (back scattering). Questa componente della radiazione incidente sul sensore non contiene informazioni sul bersaglio;
- la componente diffusa, che riguarda la radiazione arrivata sul bersaglio dopo essere stata diffusa dall'atmosfera. Questa componente compensa l'attenuazione della radiazione diretta che viene perduta per lo stesso processo di diffusione nel tragitto diretto sole-bersaglio;
- la componente ambientale, che si riferisce alla frazione della radiazione riflessa al di fuori della superficie del target e diffusa verso il sensore. È una componente che viene considerata con particolare attenzione nel 6S. Se la superficie è uniforme si tratta di una componente utile, ma se la struttura della superficie è complessa questo termine introduce degli effetti perturbativi detti *effetti ambientali*;
- la componente *multi-scattering*: considera i fotoni diffusi più volte nel tragitto tra superficie e atmosfera prima di raggiungere il sensore. È il cosiddetto “effetto trappola”. Generalmente, si tratta di un termine di importanza moderata e trascurabile.

Per ottenere i valori assoluti di riflettanza dalle immagini si deve calibrare il modello 6S utilizzando informazioni acquisite in situ per alcuni punti di riferimento che appartengono alla scena da riprendere con il sensore remoto (queste informazioni vengono indicate con il nome di “verità a terra”) ed avere la risposta con la quale il sensore rileva lo spettro solare. Questa risposta è una curva a disposizione di chi gestisce il sensore e fornisce le immagini ed è compresa nella fornitura. Nel caso del volo QuickBird del 16 maggio 2002 su Venezia la risposta spettrale del sensore non è ancora stata trasmessa e quindi i valori di riflettanza a disposizione possono essere usati per valutazioni relative e non si prestano a confronti con altre immagini (dello stesso o di altro sensore). Questo disagio non ha finora intralciato il lavoro perché la scena acquisita era stata ben documentata con misure a terra eseguite in contemporanea al volo QuickBird e in tempi prossimi a quella data.

³ Per quanto riguarda lo *scattering* atmosferico si possono distinguere tre comportamenti tipici della luce con la materia a seconda delle dimensioni delle particelle interferenti: lo *scattering* di *Rayleigh* si verifica quando il bersaglio è di dimensioni molto minori rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione; lo *scattering* di *Mie* avviene quando le dimensioni del bersaglio sono comprese nell'intervallo tra 0,1 e 10 volte la lunghezza d'onda della radiazione; il terzo tipo è noto come “*scattering non selettivo*” e si ha con bersagli di dimensioni molto maggiori della lunghezza d'onda della radiazione.

Alcuni dei parametri rilevati per tarare il modello 6S sono stati registrati con lo spettrofotometro CIMEL collocato sull'edificio del CNR-ISDGM di Venezia che misura ogni 5' lo spessore ottico dell'atmosfera, la funzione di distribuzione dell'aerosol e il contenuto di vapore d'acqua.

I dati vengono processati a diversi livelli⁴ nei laboratori della NASA ed archiviati nel sito internet <http://www.aeronet.gsfc.nasa.gov:8080/>.

Per la correzione delle immagini acquisite dai sensori aerotrasportati MIVIS e CASI si utilizzano i valori registrati presso l'aeroporto di Tessera dal fotometro CIMEL CE 318, di proprietà dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti di Venezia, che opera nel visibile e vicino infrarosso e consente di ottenere lo spessore totale della colonna di vapore acqueo, l'assorbimento dovuto all'ozono e le proprietà dell'aerosol.

Durante le campagne di misura effettuate il 19 luglio e il 28 settembre 2002 sono state inoltre raccolte anche le informazioni ancillari per la correzione atmosferica delle immagini MIVIS nelle bande del termico.

L'eliminazione dell'interferenza atmosferica rappresenta una fase fondamentale di preelaborazione delle immagini: l'atmosfera infatti modifica la risposta spettrale di un oggetto in ragione della quota d'osservazione e delle condizioni meteorologiche, quindi la correzione di questa distorsione consente di poter confrontare gli spettri di bersagli rilevati da diversi sensori remoti fra loro e con quelli rilevati in loco da strumenti portatili. Questa operazione è pertanto necessaria se si desidera confrontare immagini rilevate sulla stessa scena ma in tempi diversi, oppure immagini rilevate da due o più sensori. In questo modo è inoltre possibile creare delle librerie spettrali che, definite le caratteristiche di ciascun bersaglio, ne raccolgano la firma tipica che ne consente il riconoscimento (Rosselli et al., 2002).

§3.3.3 La correzione geometrica

Le correzioni geometriche servono sia per eliminare le deformazioni introdotte dal sistema di ripresa, sia per mettere a confronto più immagini: nel caso di immagini della stessa area riprese da diversi sensori, la messa a registro permette di confrontare i valori spettrali dei *pixel* in un numero più elevato di bande, consentendo di ottenere informazioni più accurate sulla posizione degli oggetti osservati e sulla loro natura.

⁴ Livello 1: dati grezzi acquisiti in automatico; livello 1,5: dati corretti per la presenza di copertura nuvolosa; livello 2: dati di qualità assicurata mediante l'uso diversi parametri di calibrazione.

Data la notevole quantità di immagini acquisite nell'ambito del progetto TIDE da sensori con caratteristiche spaziali differenti, è quindi necessario renderle geometricamente congruenti con un sistema di riferimento prescelto.

Le immagini QuickBird vengono geometricamente corrette dalle stazioni riceventi prima che i dati siano distribuiti agli utenti: sull'immagine fornita è stata quindi precedentemente effettuata la compensazione per le incertezze relative all'assetto e alla posizione sull'orbita di sorvolo, per la curvatura e la rotazione terrestre durante la ripresa e per la distorsione panoramica⁵. Nonostante queste correzioni, l'accuratezza nominale del dato risultava pari a $\pm 25\text{m}$ e quindi assolutamente inadeguata all'utilizzo per il riconoscimento delle aree di vegetazione delle barene. Pertanto si è proceduto ad un'ulteriore rettificazione e georeferenziazione mediante l'impiego di punti di riferimento raccolti nelle varie campagne di misura.

Per avere a disposizione dei punti di controllo a terra (chiamati GCP: *Ground Control Points*) con cui correggere le immagini sono state rilevate le coordinate di punti ben riconoscibili nelle immagini (ad es. confluenze di canali, ghebi, palificate e siti a morfologia caratteristica) mediante GPS differenziale e teodolite laser ad elevata precisione (v.Cap.IV). Le misure sono state eseguite principalmente sulle barene Pagliaga e San Felice.

Per l'identificazione degli elementi in esame all'interno della scena è stato necessario registrare in un opportuno sistema di coordinate geografiche l'immagine acquisita. Il sistema di riferimento adottato è la proiezione cilindrica inversa Gauss-Boaga, in cui le coordinate vengono calcolate avendo come punto di origine il meridiano passante per Monte Mario a Roma, sull'ellissoide Internazionale (o di Hayford) ROMA 1940, e proiettate in coordinate piane chilometriche con false origini a 1500 km dal meridiano di riferimento nel fuso ovest (da 6 a 12 gradi ad est di Greenwich) e a 2520 km nel fuso est (da 12 a 18 gradi ad est di Greenwich).

I punti acquisiti sono stati inseriti sull'immagine mediante una funzione di *warping* della matrice di *pixel* implementata nel software di elaborazione delle immagini ENVI (*ENVIRONMENTAL FOR VISUALIZING IMAGES*), che visualizza l'accuratezza della registrazione mediante la stima dell'RMS⁶ (*Root Mean Squared*). Per l'individuazione dei punti

⁵ Indica la modificazione sull'immagine della dimensione dei *pixel* della scena, a causa della non linearità di funzionamento dei sistemi di ripresa basati a scansione: allontanandosi dalla posizione nadir, in un singolo *pixel*, definito da un campionamento ad intervalli di tempo costanti, viene rappresentata un'area sempre più estesa in ragione della tangente dell'angolo tra la verticale e la direzione dell'IFOV. Questo errore diventa importante nelle immagini ottenute con un angolo totale di vista maggiore di 30° da entrambi i lati della verticale (Gomarasca, 1997).

⁶ L'RMS dà indicazioni sull'errore di posizionamento medio che ha l'immagine trasformata rispetto alle coordinate geografiche dell'immagine originaria e indica quindi la qualità della trasformazione.

rilevati si è utilizzata l'immagine acquisita nel pancromatico, la cui risoluzione spaziale di 70 cm ha consentito di discriminare agevolmente sulle barene le caratteristiche morfologiche utili per la georeferenziazione; in seguito la procedura è stata estesa anche all'immagine multispettrale mediante la funzione del software ENVI *link displays*, che ha permesso il riconoscimento delle medesime strutture sull'immagine di risoluzione inferiore (fig.3.3).

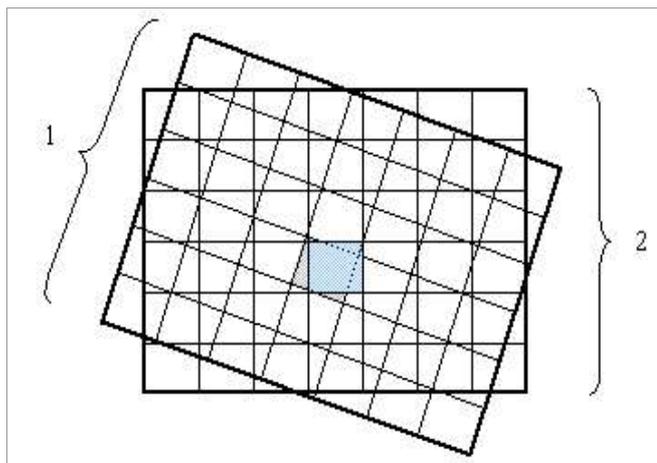


Fig.3.3 - Posizionamento dei GCP acquisiti presso S.Felice sull'immagine multispettrale a colori reali.

Il processo di correzione è avvenuto mediante una trasformazione geometrica delle coordinate dell'area ripresa: una simile procedura modifica la posizione dei *pixel* sull'immagine, la cui radiometria non rappresenta più i valori reali misurati sulla scena, quindi è necessario effettuare un ricampionamento dei dati di radianza rilevati al suolo ed una interpolazione matematica dei livelli di grigio. Il criterio utilizzato per calcolare il livello di grigio da assegnare al nuovo *pixel* individuato è quello del “prossimo vicino” (*nearest neighbour*): con questa tecnica, che è un'approssimazione del primo ordine, il valore di radianza assegnato è il numero digitale del *pixel* che ha le coordinate (M,N) di riga e colonna -valori interi- più vicine alle coordinate (X,Y) -valori reali- ottenute dalla trasformazione geometrica (fig.3.4) (Brivio et al., 1992).

Questo tipo di interpolazione è stato scelto sia per i limitati tempi di calcolo sia perché conserva inalterati i valori originali di radianza. La nuova immagine ottenuta si è rivelata molto accurata presentando un RMS inferiore a $0,5 \text{ pixel}^7$: data la risoluzione geometrica dell'immagine, la precisione con cui si identificano gli oggetti al suolo corrisponde a $\pm 35 \text{ cm}$ nel pancromatico e a $\pm 1,40 \text{ m}$ nel multispettrale.

⁷ L'accuratezza della georeferenziazione è risultata maggiore nell'area relativa alla barena di San Felice, presso la quale i *Ground Control Points* rilevati sono molto più numerosi di quelli registrati negli altri siti di indagine.



L'acquisizione dei GCP presso le aree di barena rappresenta la fase critica del processo di georeferenziazione. A questo proposito Mather (1987) sottolinea la necessità di soddisfare tre condizioni essenziali per garantire un'accurata correzione geometrica:

1. il numero di punti individuati deve essere appropriato per consentire l'applicazione della trasformazione lineare dell'immagine: maggiore è l'ordine del polinomio interpolante che si sceglie di utilizzare, maggiore dovrà essere il numero complessivo di GCP. In genere sulle barene i punti individuabili che si riescono poi a riconoscere nell'immagine non sono in numero sufficiente per una interpolazione con polinomi di ordine superiore, quindi si effettuano interpolazioni mediante polinomi di primo ordine;
2. i punti devono essere distribuiti in maniera diffusa su tutta l'area rappresentata nell'immagine, e non essere limitati a transetti lineari che forniscono esclusivamente informazioni di natura monodimensionale e non dando alcuna informazione relativa alle variazioni nelle direzioni ad essi perpendicolari. Ciò rappresenta una condizione non sempre possibile quando, come nel caso dell'area lagunare osservata, una cospicua parte dell'immagine è occupata dal mare o da specchi d'acqua dove i punti di controllo sono assenti;
3. non ci deve essere una sostanziale differenza tra la data di acquisizione dell'immagine e quella di individuazione dei punti di controllo a terra, in quanto risulta poco affidabile la selezione di punti in corrispondenza di caratteristiche morfologiche soggette a rapidi cambiamenti, come meandri di canali e ghebi o aree di bordo che sono periodicamente sommerse dalle maree e possono risultare "mascherate" dall'acqua in occasione dell'effettuazione della ripresa remota.

§3.4 La fase di elaborazione dell'immagine

Le prime elaborazioni dell'immagine intendono evidenziare le caratteristiche fondamentali dei dati acquisiti e ottenere le prime informazioni sulla capacità del

senso di discriminare le principali strutture presenti nell'area osservata, in assenza di ulteriori elaborazioni digitali e prima di operare le classificazioni.

L'istogramma di frequenza rappresenta un semplice ma utile strumento per ottenere tali informazioni: esso illustra la funzione di distribuzione del numero di *pixel* per ogni numero digitale DN o livello di grigio: sull'ascissa compaiono i numeri digitali presenti nell'immagine e sull'ordinata le frequenze assolute o percentuali di ogni valore. Tale elaborazione dell'immagine la caratterizza solamente da un punto di vista statistico, senza fornire informazioni sulla disposizione spaziale dei livelli di grigio dell'immagine. In fig.3.5 vengono rappresentati gli istogrammi relativi alla sottoimmagine dell'area di San Felice, in assenza di correzione radiometrica.

Come si nota, gli istogrammi delle bande 1, 2 e 4 sono di tipo 3-modale: presentano infatti tre massimi distinguibili, corrispondenti a raggruppamenti di oggetti con risposta simile tra loro; in particolare, il picco di massimo assoluto corrisponde ai *pixel* relativi alla classe "acqua", che presentano valori piuttosto diversi nelle quattro bande del sensore, mentre il picco di massimo relativo corrispondente ai *pixel* di "vegetazione" risulta più pronunciato nelle bande 1, 2 e NIR che nel rosso, dove i valori sono distribuiti in un ampio intervallo di DN.

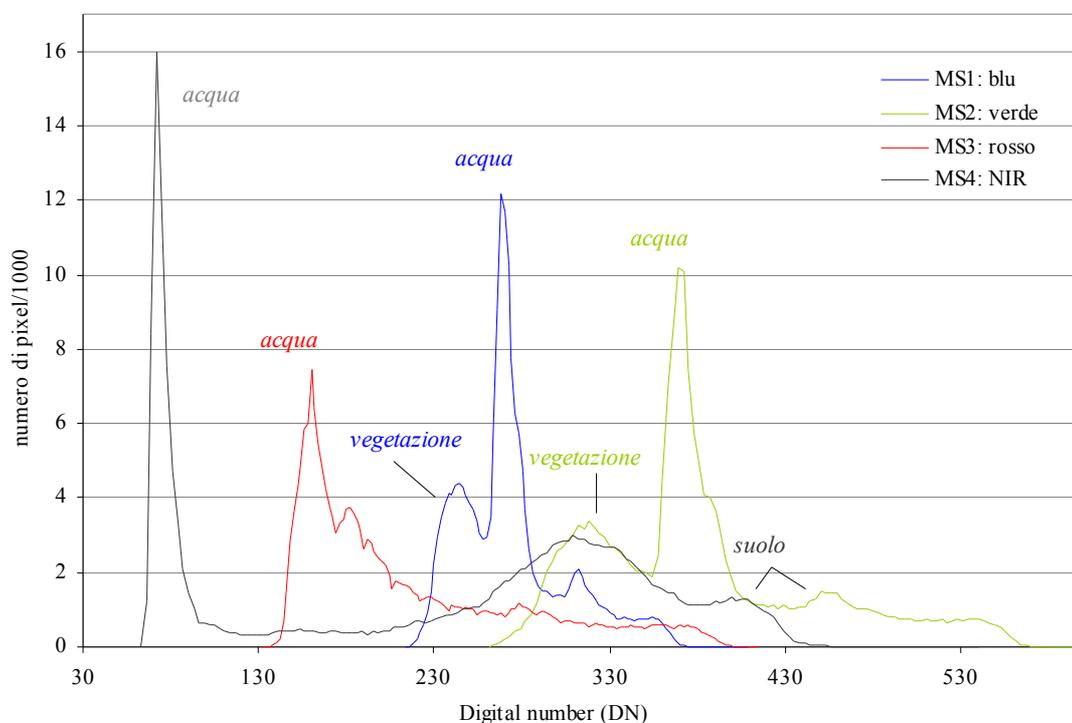


Fig.3.5 - Istogramma di frequenza dell'immagine multispettrale

Come ci si aspetta, la riflettanza della vegetazione risulta minore nel blu e nel rosso in quanto queste porzioni del visibile vengono assorbite dalle piante per il processo fotosintetico, mentre il verde e l'infrarosso presentano valori pressoché identici di riflettanza per il picco della vegetazione.

Nelle bande B, G e NIR compare anche il massimo relativo corrispondente ai *pixel* di riflettanza maggiore, che rappresentano la classe "suolo": si tratta dei valori registrati per le aree di bassofondo e di suolo nudo presenti nell'area di San Felice, ed individuabili nell'immagine in quanto l'acquisizione è avvenuta alle ore 10.04 del 16 maggio 2002, quando la marea registrata nella zona era di circa 0m l.m.m e le aree in genere sommerse risultavano ben visibili.

Nel canale del rosso i *pixel* relativi alla classe suolo non sono distinguibili in numero da quelli di vegetazione, ma assumono valori molto più elevati (maggiori di 320) e sono comunque distinguibili nell'immagine.

Gli istogrammi relativi alle 4 bande, e l'istogramma complessivo ottenuto per la banda pancromatica, riportato in fig.3.6, mostrano quindi come il sensore sia in grado di discriminare nella scena le tre distinte classi di oggetti presenti; dal momento che l'immagine multispettrale viene acquisita separando la radianza secondo il contributo fornito nei diversi intervalli spettrali, l'interpretazione dell'istogramma viene completata da un secondo strumento di elaborazione chiamato *scatter plot* o *istogramma a due o più dimensioni*.

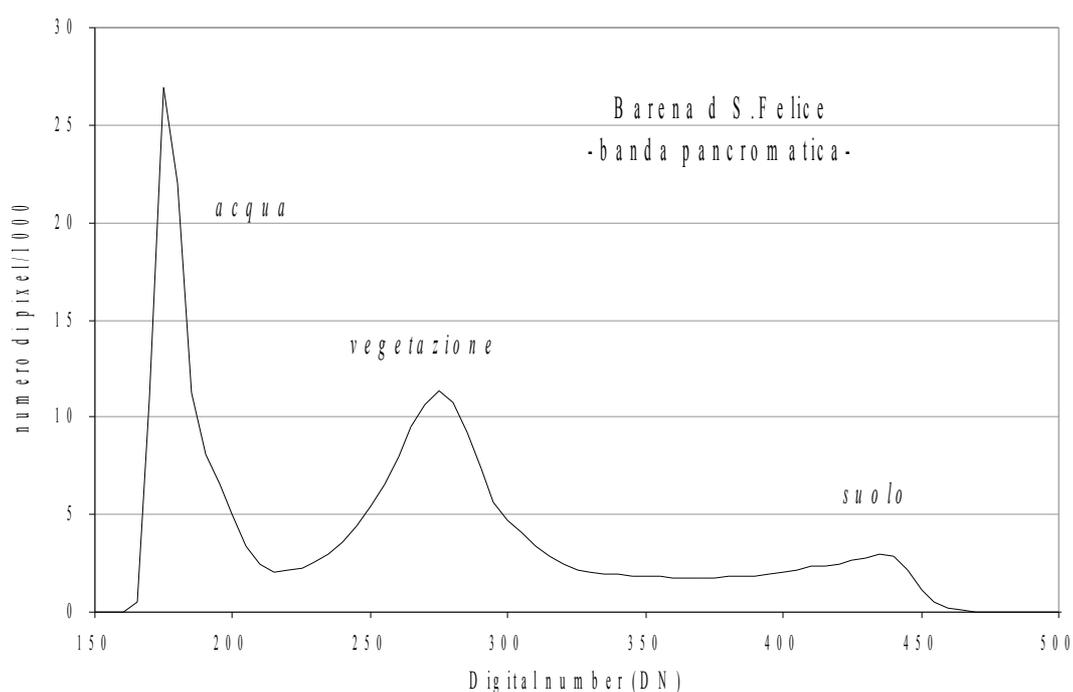


Fig.3.6 - Istogramma di frequenza 3-modale dell'immagine pancromatica.

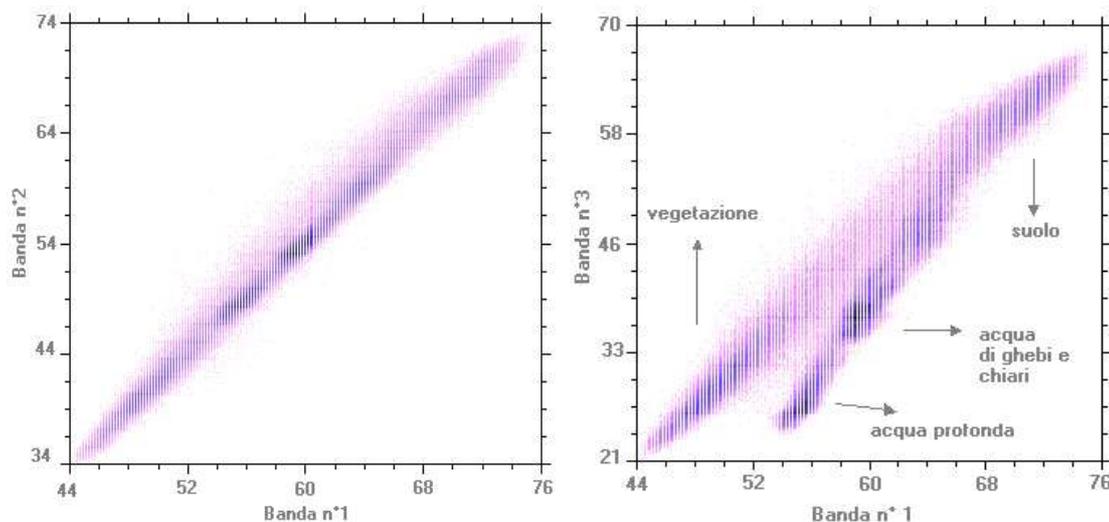
Nelle figg.3.7÷3.12 sono riportati i confronti tra le bande del sensore relativi al ritaglio dell'immagine QuickBird che comprende l'area di San Felice: gli assi x_1 e x_2 rappresentano i numeri digitali delle due bande considerate, mentre l'asse z (immaginato in profondità nel foglio) rappresenta il numero di *pixel* che in una banda hanno un dato numero digitale DN_1 individuato dalla coordinata x_1 e nell'altra banda un altro numero digitale DN_2 individuato dalla coordinata x_2 .

Lo scatter plot rappresenta quindi una semplificazione dell'istogramma bidimensionale: se la distribuzione dei valori nelle bande che vengono confrontate è in entrambi i casi gaussiana, la nuvola di punti che si ottiene rappresenta un'ellisse (o n ellissi nel caso in cui gli istogrammi delle bande siano n -modali). Il confronto fra le coppie di bande disponibili fornisce informazioni sulla separabilità spettrale degli oggetti presenti nella scena: quando le ellissi di punti mostrano un certo grado di sovrapposizione, allora le due bande di confronto non consentono di distinguere le diverse classi al suolo; viceversa, la netta separazione delle ellissi permette di identificare quali siano le bande che meglio discriminano tali classi e che quindi consentono di ottenere classificazioni più accurate.

Nella rappresentazione grafica del confronto fra le bande (v.figg.3.7÷3.12), il colore riflette la densità di *pixel* individuati da ogni coppia di DN: tonalità di violetto più scure indicano quindi densità maggiori di *pixel*.

Il confronto fra i DN registrati nelle bande 1 e 2 mostra una chiara dipendenza lineare tra le due variabili, quindi l'esclusivo utilizzo di queste due bande nella fase di classificazione non è sufficiente per discriminare le differenti categorie di oggetti presenti al suolo.

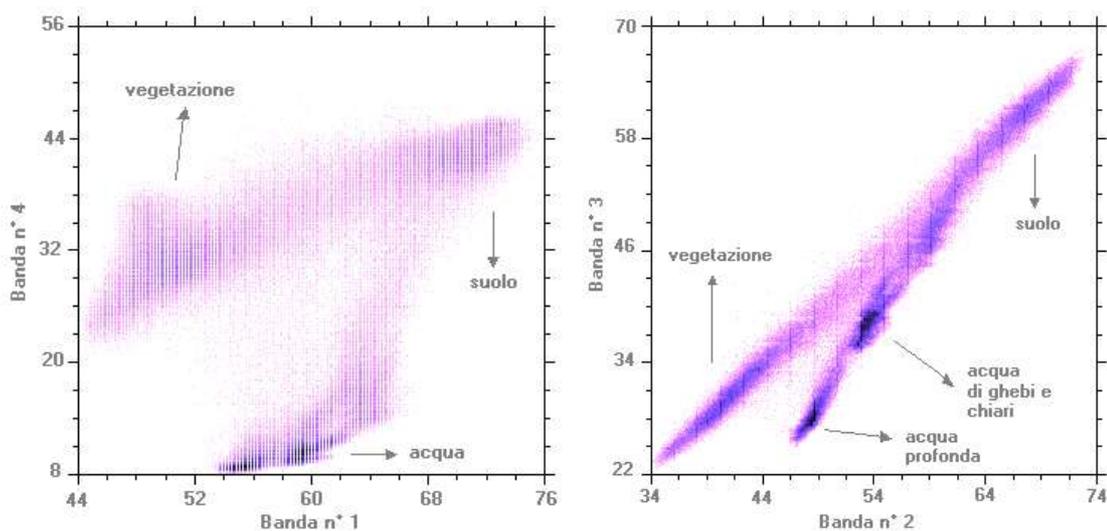
La separazione tra i *pixel* risulta maggiore utilizzando le bande 1 e 3: introducendo nel confronto la banda del rosso, infatti, si cominciano ad evidenziare tre *cluster* principali (acqua, vegetazione e suolo); inoltre, all'interno della classe "acqua" si distinguono piuttosto nettamente il gruppo di *pixel* relativi all'acqua profonda, caratterizzati da DN inferiori, e il gruppo che identifica le acque di ghebi, chiari e canali minori.



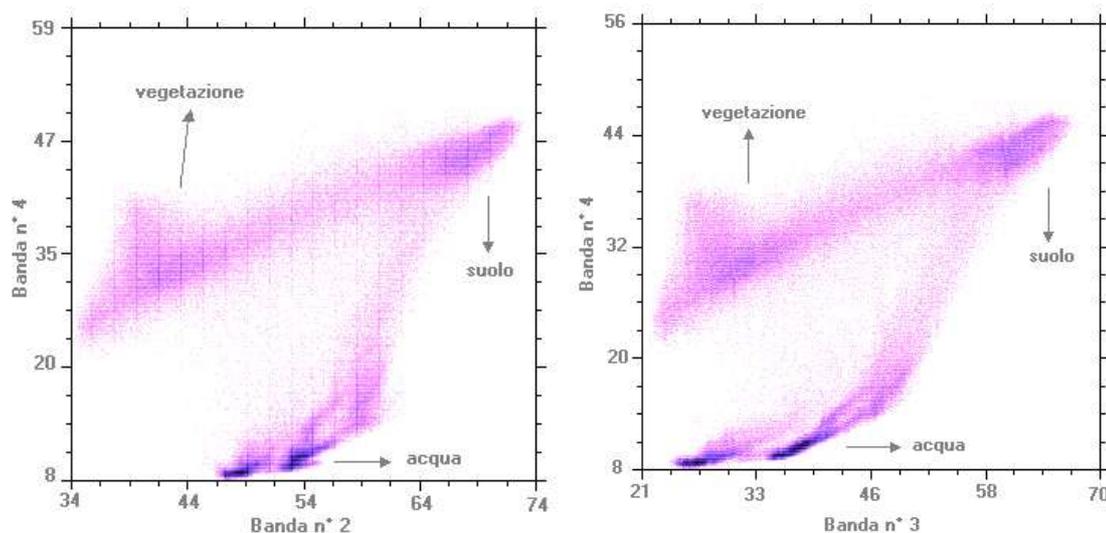
Figg.3.7 e 3.8 - Confronto tra le bande 1-2 e 1-3 del sensore QuickBird.

La distinzione fra le classi si fa più evidente nel confronto tra la banda 2 del verde e la 3 del rosso: in particolare risultano separate le due sottocategorie della classe “acqua” ed è più netta la definizione della categoria “vegetazione”.

Negli *scatter plot* che coinvolgono la banda del NIR (banda 4), infine, i tre principali gruppi di *pixel* si separano ulteriormente, e le classi corrispondenti possono essere agevolmente individuate; in particolare la nuvola di valori corrispondenti alla classe vegetazione risulta piuttosto diffusa, indicando un livello di correlazione molto basso tra le bande di confronto e rendendo quindi possibile la distinzione di ulteriori gruppi di vegetazione che si differenziano all'interno del *cluster* complessivo.



Figg.3.9 e 3.10 - Confronto tra le bande 1-4 e 2-3 del sensore Quickbird.



Figg.3.11 e 3.12 - Confronto tra le bande 2-4 e 3-4 del sensore QuickBird.

Da quanto detto risulta che il contenuto informativo fornito dall'uso simultaneo delle quattro bande del sensore QuickBird non solo consente di individuare la composizione principale della scena osservata, ma suggerisce anche la possibilità di sfruttare la debole correlazione tra alcune delle bande per discriminare all'interno dell'immagine le diverse risposte spettrali delle macchie di vegetazione di barena.

L'influenza del grado di separabilità fra le categorie al suolo sull'esito della classificazione dell'immagine sarà discussa in maggior dettaglio nel Cap.VI.

§3.5 Considerazioni

La tecnica del telerilevamento rappresenta la metodologia più adeguata per l'osservazione di ambienti vasti e di difficile accesso come le barene; in particolare, l'uso integrato di sensori multi e iperspettrali consente di raccogliere un'enorme quantità di dati relativi alla caratterizzazione morfologica di tali strutture a diversi gradi di risoluzione spaziale e spettrale.

Le immagini acquisite vanno incontro ad un primo processo di correzione allo scopo di renderle fra loro confrontabili, mentre le fasi successive mirano ad estrarre il contenuto informativo racchiuso nei dati raccolti al fine di consentirne l'interpretazione e l'eventuale traduzione in rappresentazioni cartografiche utilizzabili. Il remote sensing è infatti uno strumento operativo di analisi che consente di individuare sul territorio aree con caratteristiche e distribuzione differenti; inoltre presenta il vantaggio di consentire

rapidi aggiornamenti e rielaborazioni delle informazioni tradotte nelle mappe tematiche in quanto le informazioni vengono conservate anche in formato digitale.

Le rappresentazioni del territorio derivanti dall'uso di sensori remoti si basano tipicamente su *classificazioni* dell'immagine, ottenute sia tramite un'interpretazione visiva che con l'aiuto del calcolatore: il criterio in base al quale avvengono l'individuazione e la separazione delle diverse classi è la loro differente risposta spettrale entro limiti di confidenza decisi di volta in volta in funzione dell'uso previsto per le rappresentazioni; le mappe tematiche vengono create evidenziando i limiti di estensione e i confini fra classi al suolo che siano omogenee o limitatamente eterogenee, e descrivendone le caratteristiche in maniera logica e coerente.

Per mettere in relazione le immagini acquisite con la reale presenza e disposizione degli elementi nell'area d'indagine, è quindi necessario raccogliere una serie di informazioni per calibrare i dati raccolti (*training data*) e per validare i risultati delle classificazioni che ne derivano (*test data*): nel prossimo capitolo verranno descritte le fasi che hanno caratterizzato l'acquisizione delle verità a terra durante le numerose campagne di misura effettuate nel primo anno di attività del progetto TIDE.