Roberto Rosselli,
Sonia Silvestri,
Angelo Zandonella*

Funzioni e strumenti del Servizio Informativo. L'applicazione del telerilevamento per l'analisi e la gestione del territorio lagunare

Premessa

L'analisi del territorio, ai fini della sua gestione, può essere completa ed efficace soltanto se i diversi strumenti disponibili per la sua conoscenza sono correlati in un sistema informativo completo e articolato. In sintesi, perché questo avvenga, è necessario che le risorse disponibili (umane, tecniche, scientifiche, economiche) concorrano in modo integrato alla creazione delle diverse percezioni del territorio, delle sue dinamiche e dei fenomeni che in esso si verificano, seguendone l'evoluzione nel breve e nel lungo periodo.

Uno dei primi strumenti di lavoro che il Servizio Informativo del Magistrato alle Acque di Venezia ha utilizzato per assolvere ai compiti di conoscenza del territorio e dell'ecosistema lagunare è stato il telerilevamento che verrà in seguito analizzato e descritto secondo i diversi obiettivi che ci si è posti con la sua adozione e le diverse modalità di applicazione.

In questa premessa viene descritto il percorso funzionale che il Servizio Informativo ha compiuto nel corso della sua operatività, dalla metà degli anni '80 a oggi, che ha portato alla realizzazione del più importante e complesso sistema di banche dati territoriali e ambientali sulla laguna. L'insieme delle informazioni acquisite ed elaborate nel tempo restituisce un quadro conoscitivo generale, costantemente aggiornato, che rappresenta anche un'indispensabile supporto, a disposizione di tutti i soggetti competenti, per la progettazione e la realizzazione delle diverse attività per la salvaguardia di Venezia.

In estrema sintesi, il compito del Servizio Informativo è consistito e consiste nel raccogliere e organizzare in modo strutturato tutte le informazioni sull'ecosistema (incluse quelle per il controllo conoscitivo delle tendenze evolutive); nel cooperare con gli altri Enti e Soggetti che interagiscono sul territorio; nel costruire il necessario supporto conoscitivo per il futuro Centro Operativo della laguna (struttura che avrà il compito di gestire gli interventi di salvaguardia compiuti dallo Stato attraverso Magistrato alle Acque - Consorzio Venezia Nuova); infine, nel monitorare l'evoluzione dello stato dell'ambiente lagunare.

Nel corso della propria attività, il Servizio Informativo ha definito e sviluppato cinque specifici settori che rappresentano le finalità proprie del Servizio stesso:

- *Biblioteche* ovvero raccolta, catalogazione informatica e aggiornamento di dati e

* Roberto Rosselli è responsabile del Servizio Informativo; Sonia Silvestri e Angelo Zandonella sono consulenti tecnico-scientifici per le applicazioni del Remote Sensing

informazioni a carattere tecnico - scientifico, storico, socioeconomico, legislativo, ecc. sulla laguna di Venezia, sul suo bacino scolante, sugli studi, sui progetti, sulle sperimentazioni e sugli interventi realizzati (queste "informazioni di base" sono raccolte e mantenute nel loro formato originario: testi storici, mappe, fotografie, diapositive, filmati, materiale digitale, relazioni tecniche e scientifiche, studi, elaborati progettuali, leggi, ecc.);

- *Banche dati* ovvero trasformazione dei dati cartografici e tecnici in dati informatizzati su computer e rappresentabili mediante i moderni strumenti di analisi e riproduzione del territorio (GIS o Sistemi Informativi Territoriali e strumenti di riproduzione). La base della banca dati territoriale del Servizio Informativo è dotata di circa 30 livelli tematici differenziati (uso del suolo, canali lagunari, reti idrografiche, sezioni di censimento, fanerogame, alghe, sondaggi, reti tecnologiche, ecc.) che vengono costantemente aggiornati mediante l'esecuzione di rilievi da compiersi in proprio o l'acquisizione di dati raccolti dagli Enti competenti;
- *Sistemi di supporto alle decisioni* ovvero utilizzo di sistemi informatici appositamente predisposti per la gestione dei dati cartografici, modellistici e tecnici finalizzati all'interpretazione di fenomeni ambientali, morfologici, socioeconomici in evoluzione e, quindi, alla loro lettura da parte degli organismi deputati alle decisioni sulla progettazione e sulla realizzazione degli interventi;
- *Studi* ovvero approfondimenti sugli aspetti tecnici delle attività connesse con il Servizio Informativo, svolti in modo integrato e contestuale con le attività di studio e monitoraggio realizzate e in corso da parte del Magistrato alle Acque attraverso il Consorzio Venezia Nuova (in particolare gli uffici del Servizio Ingegneria e del Servizio Ambiente);
- *Sistemi di consultazione* ovvero realizzazione di sistemi informatici personalizzati per la fruizione dei dati archiviati dal Servizio Informativo e utilizzabili da più utenti della rete Magistrato alle Acque – Consorzio Venezia Nuova.

I risultati fin qui raggiunti possono essere così sintetizzati:

- è stata costituita una raccolta ordinata di documenti (libri, mappe, nastri, audiovisivi) attinenti l'ecosistema, raggiungendo l'obiettivo istituzionale di raccogliere e conservare in un'unica sede il vastissimo patrimonio di conoscenze sul sistema laguna e sulla cosiddetta "questione Venezia";
- è stata informatizzata (insieme ai principali parametri descrittivi del territorio) la complessa e stratificata geografia dell'ecosistema che rimane a disposizione come

GIS di base (ovvero come sistema informatizzato di gestione e analisi delle rappresentazioni delle componenti territoriali) per le future applicazioni;

- sono stati adottati sistemi informatici basati su una struttura hardware e software che si mantiene all'avanguardia e bilanciata nei suoi componenti anche dopo alcuni anni di lavoro, nonostante l'accelerata dinamica evolutiva che caratterizza questo tipo di mercato. La struttura informatica del Servizio Informativo è stata, inoltre, integrata alla struttura informatica costituita presso il Centro elaborazione dati del Magistrato alle Acque, da cui, infine, è possibile connettersi al Centro di Voltabarozzo, al Laboratorio di analisi chimiche di Venezia e al Genio Civile Opere Marittime di Venezia;
- è stata adottata una tipologia dei dati che semplifica e minimizza i tempi di aggiornamento degli stessi, permette di analizzare e rappresentare la loro evoluzione temporale, quantitativa e qualitativa, e può ridurre i costi e i tempi delle operazioni di verifica e controllo degli scenari territoriali, necessari per la progettazione degli interventi;
- è stata creata un'architettura delle strutture informatiche preposte alla gestione dei dati (banche dati) modulare e flessibile agli ulteriori sviluppi (sistemi di supporto) e adattabile agli obiettivi ampi e complessi che per legge sono assegnati all'intero "progetto Venezia".

Principi e vantaggi del telerilevamento

Il telerilevamento rappresenta oggi uno strumento assolutamente essenziale per lo studio dell'ambiente e la pianificazione del territorio. La sua nascita può essere identificata con lo sviluppo della tecnica fotografica che, dal 1839, ha permesso di "campionare" una scena in un determinato istante. Questa straordinaria possibilità ha completamente trasformato la capacità dell'uomo di osservare gli oggetti, fornendo alle scienze moderne un nuovo strumento di misura quantitativo.
La scoperta dell'esistenza di radiazioni elettromagnetiche non comprese nell'intervallo spettrale del visibile è stata presto utilizzata per sviluppare ulteriormente gli strumenti e le tecniche di interpretazione, sottolineando i limiti dell'occhio umano nella lettura dei fenomeni che ci circondano e incoraggiando la ricerca di nuovi strumenti di osservazione.
La possibilità di osservare la terra dallo spazio si è concretizzata, alla metà del XX secolo, da principio con il lancio del primo satellite adibito a tale scopo (Sputnik I), poi con la creazione della NASA. Inizialmente il telerilevamento da satellite è stato usato

per studi di meteorologia e climatologia. In seguito, grazie anche alla sensibilizzazione pubblica sulle risorse non rinnovabili, i dati da satellite sono stati applicati all'agronomia e allo studio del territorio.
I vantaggi del telerilevamento sono essenzialmente tre:

- la possibilità di osservare aree molto vaste di territorio in modo quasi istantaneo e a basso costo;
- la possibilità di ripetere le osservazioni nel tempo, creando banche dati utili per i monitoraggi dei fenomeni evolutivi;
- la possibilità di monitorare aree di difficile accesso quali le foreste pluviali, le catene montuose, i deserti, le zone umide (come, ad esempio, la laguna di Venezia).

Nel corso del tempo non solo si è evoluta la tecnologia applicata allo sviluppo dei sensori, ma soprattutto si sono raffinate le tecniche di analisi, consentendo di estrarre dai dati telerilevati informazioni sempre più significative.
Per meglio comprendere l'evoluzione dei sistemi va innanzitutto precisato che uno strumento per il telerilevamento, che sia portatile, montato su piattaforma aerea o su satellite, è uno strumento di misura dell'energia elettromagnetica. Esistono strumenti attivi, in grado cioè di emettere dell'energia che colpisca un bersaglio per poi misurare la radiazione riflessa, e strumenti passivi, che misurano solamente l'energia emessa spontaneamente da un corpo o da esso riflessa[1]. La maggior parte delle osservazioni del territorio e dell'ambiente vengono effettuate con dispositivi passivi "a scansione", capaci di misurare l'energia elettromagnetica riflessa dalle superfici procedendo per righe tra loro parallele, fino alla completa copertura dell'intera area di interesse (Lechi, 1997).

Risoluzione geometrica e risoluzione spettrale

I dati campionati con un sistema a scansione (o *scanner*) sono disposti su una griglia regolare, la cui unità fondamentale (cioè l'area più piccola esplorata dallo strumento) si definisce *pixel* (da *picture element*). La dimensione del pixel coincide anche con il concetto di "risoluzione geometrica" (Lechi, 1997): al diminuire delle dimensioni del pixel aumenta la risoluzione geometrica del dato. Stabilita una certa quota di volo dell'aereo oppure del satellite che ospita il sensore, la dimensione del pixel varia a seconda delle caratteristiche dell'ottica dello strumento.
Negli anni, l'evoluzione tecnologica ha consentito di costruire sensori sempre più sofisticati, in grado di esplorare la superficie terrestre con griglie sempre più fitte. Basti pensare, ad esempio, all'evoluzione della serie di satelliti Landsat: i primi due

[1] Facendo riferimento agli strumenti fotografici, una macchina che opera con il flash è un esempio di strumento attivo, mentre la stessa macchina diventa passiva quando opera utilizzando solo la luce del sole che viene riflessa dalle superfici fotografate. Altri esempi di strumenti attivi sono i sistemi radar o quelli che utilizzano raggi laser

modelli ospitavano il sensore RBV, che restituiva pixel di 80x80 m^2, e il sensore MSS (Multispectral Scanning System), caratterizzato da pixel di 79x79 m^2. Già il Landsat 3 montava un sensore RBV con un pixel di 40x40 m^2, cioè un quarto di quello dei sensori precedenti. I sensori TM (Thematic Mapper) fanno la loro comparsa per la prima volta con il satellite Landsat 4 e consentono una risoluzione ancora maggiore, pari a 30x30 m^2.
Importanti progressi sono stati compiuti, nel tempo, anche rispetto al campionamento della radiazione elettromagnetica. L'energia riflessa dalla superficie terrestre è caratterizzata da uno spettro elettromagnetico[2] con diverse frequenze d'onda: i raggi x o quelli ultravioletti, ad esempio, sono caratterizzati da onde ad alta energia, alta frequenza e piccola lunghezza d'onda (lunghezze minori di 0,35 mm); la luce infrarossa, al contrario, ha lunghezze d'onda elevate (superiori a 0,75 mm) e basse frequenze. Tra queste due regioni si trova quella della luce visibile, che copre un intervallo di lunghezza d'onda compreso tra 0,35 e 0,75 mm. Gli strumenti a scansione campionano lo spettro elettromagnetico suddividendolo in intervalli di lunghezza d'onda e misurando tutta l'energia riflessa da una superficie all'interno di ogni intervallo. Questi intervalli vengono anche definiti "canali" o "bande".
L'intervallo di lughezza d'onda cui è sensibile uno strumento viene definito "risoluzione spettrale" (Lechi, 1997): all'aumentare del numero di canali cresce la risoluzione spettrale dello strumento e aumentano anche le possibilità per l'operatore di distinguere tra diverse superfici terrestri, diversi usi del suolo, diverse caratteristiche dell'acqua, ecc.

Sviluppo di satelliti e sensori

Per venire incontro alle esigenze degli utilizzatori, le case di costruzione hanno investito negli ultimi anni ingenti risorse, sviluppando satelliti sempre più piccoli e di facile controllo, che ospitano sensori sempre più sofisticati, capaci di fornire dati a risoluzioni elevate. Il sensore IKONOS, ad esempio, recentemente lanciato nello spazio a bordo di uno degli ultimi satelliti commerciali, è in grado di fornire dati multispettrali (tre bande nel visibile, rosso, verde e blu, e una che copre l'infrarosso vicino) con pixel di 4x4 m^2. Lo stesso sensore possiede, inoltre, una banda pancromatica (cioè che copre tutto il visibile e il vicino infrarosso) che restituisce una risoluzione di 1x1 m^2, consentendo di distinguere oggetti di dimensioni incredibilmente piccole se si considera che vengono osservati dallo spazio, come ad esempio automobili, edifici, natanti o alberi.

[2] Distribuzione monodimensionale continua dell'energia elettromagnetica ordinata normalmente per lunghezze d'onda crescenti

Sempre rimanendo nel campo dei sensori satellitari, il nuovissimo Quick-Bird, appena messo in orbita, sarà presto in grado di fornire dati multispettrali (cioè immagini satellitari diverse, suddivise per intervalli di frequenze differenziate) con risoluzione di 2,4x2,4 m^2 e dati pancromatici con pixel di appena 0,54x0,54 m^2.
Numerosi investimenti sono anche stati impiegati per la costruzione di sensori aviotrasportati che oggi sono in grado di fornire dati a elevata risoluzione geometrica e spettrale. Il sensore MIVIS (Multispectral Infrared and Visibile Imaging Spectrometer), ad esempio, campiona lo spettro elettromagnetico suddividendolo in ben 102 bande, 20 delle quali coprono l'intervallo del visibile, 8 quello del vicino infrarosso, 64 quello del medio infrarosso e 10, infine, l'intervallo spettrale del termico.
L'evoluzione tecnologica di satelliti e sensori, accoppiata a quella delle tecniche di analisi dei dati, da un lato ha prodotto un'enorme ricchezza di informazioni sull'ambiente, dall'altro lato ha comportato un grosso impegno per coloro che utilizzano questi dati per studi e ricerche.

Modalità di impiego. La scelta del sensore

L'utilizzo del telerilevamento per studi ambientali prevede essenzialmente tre fasi:
- scelta del sensore con cui acquisire i dati (da satellite, da aereo o da terra);
- elaborazione dei dati;
- interpretazione dei risultati.

La prima fase è sicuramente la più delicata, poiché in un certo senso comprende le altre due. Prima di decidere quale tipo di dato acquisire, infatti, è importante concentrarsi sugli obiettivi del lavoro, prevedendo sia il tipo di elaborazioni da effettuare sia i risultati che si vorrebbero ottenere. Prima di procedere alla scelta del sensore più appropriato, quindi, si studiano le caratteristiche spettrali del bersaglio da rilevare, la scala di variabilità spaziale del fenomeno da osservare e la variabilità temporale delle condizioni ambientali.
Quest'ultimo problema è stato ed è essenziale nella scelta degli strumenti che di volta in volta possono essere utilizzati. Va infatti ricordato che in un ambiente complesso come, ad esempio, la laguna di Venezia, i fenomeni osservabili agiscono a scale diverse: vi sono processi climatici che agiscono a scala globale (basti pensare alla relazione tra effetto serra e aumento del livello dei mari), fenomeni a scala regionale (come gli apporti di nutrienti dal bacino scolante), fenomeni a scala locale (come le proliferazioni algali), e così via, fino ad arrivare a fenomeni di micro-scala. Ogni processo va, pertanto, studiato a una scala specifica, e questo concetto va applicato ai

dati telerilevati che, a seconda dello strumento con cui sono stati acquisiti, possiedono, come detto, risoluzioni molto diverse. A titolo di esempio nella figura 1, a pagina 10, è raffigurata una zona di Burano ripresa rispettivamente col Landsat TM, col MIVIS e con IKONOS.
Si potrebbe pensare che maggiore è la risoluzione dei dati, maggiore è il numero di applicazioni per cui possono servire. Va invece sottolineato che lo spazio disponibile per memorizzare i dati è comunque limitato, e pertanto all'aumentare della risoluzione diminuisce l'area di territorio ripresa dagli strumenti. Per studiare alcuni fenomeni che agiscono su meso e macro-scala, per i quali un'eccessiva quantità di informazioni è ridondante, è molto più utile un'immagine acquisita istantaneamente che copre una porzione molto vasta di territorio piuttosto che un insieme di immagini contigue acquisite in tempi diversi.

Analisi e monitoraggio della laguna di Venezia
L'archivio di dati telerilevati del Servizio informativo

La laguna di Venezia è il luogo ideale per l'applicazione del telerilevamento ambientale: essa, infatti, ricopre un territorio di oltre 550 km^2, in gran parte formato da bassifondali, velme e barene; un territorio in continua evoluzione e spesso di difficile accesso dove i processi fisico-chimici sono altamente dinamici, estremamente complessi da monitorare nello spazio e nel tempo.
Dalla metà degli anni '80 a oggi, il Servizio Informativo ha acquistato, per conto del Magistrato alle Acque, numerose immagini satellitari, realizzate con strumenti e metodi sempre più sofisticati, oltre a immagini provenienti da sensori montati su piattaforma aerea che forniscono il dato a un determinato istante predefinito. In questo modo è stato creato un archivio differenziato, a diverse risoluzioni geometriche e temporali, che si arricchisce ogni anno di almeno 4-5 immagini satellitari di "routine", ma comprende anche dati acquisiti con i più recenti e avanzati sistemi di rilevamento, (che permettono di esplorare non solo le nuove tecniche di acquisizione ma anche molti nuovi strumenti di elaborazione) come, per esempio, le immagini di IKONOS.
L'archivio di dati telerilevati organizzato dal Servizio Informativo è oggi il più vasto esistente sulla laguna di Venezia. Esso contiene oltre 90 immagini acquisite dai sensori satellitari multispettrali Landsat 5 (sensore Thematic Mapper) e Landsat 7 (sensore Enhanced Thematic Mapper), dal sensore satellitare pancromatico SPOT e dal sensore radiometrico ERSI-SAR, a cui si aggiungono i dati acquisiti nel 1995 e nel 1998 con il sensore iperspettrale MIVIS da piattaforma aerea e quelli del satellite multispet-

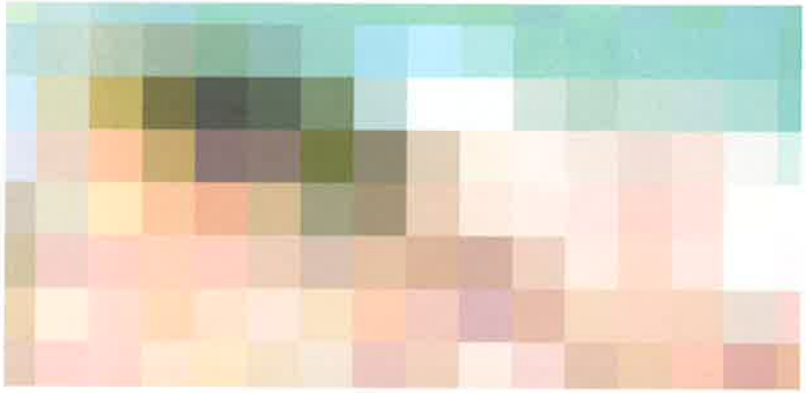


Figura 1 Confronto tra immagini Landsat TM, MIVIS e IKONOS relative alla zona nord di Burano. È evidente la differente risoluzione delle immagini: il TM ha campionato il territorio con pixel di 30x30 m^2; il MIVIS ha restituito, della stessa area, una griglia con pixel di 3x3 m^2 (data la quota di volo dell'aereo su cui era montato); mentre il sensore IKONOS, che possiede un canale pancromatico a 1 m di risoluzione, dopo un opportuno ricampionamento dei dati multispettrali, ha restituito un'immagine a colori con pixel di 1x1 m^2

Figura 2. Immagine a colori quasi naturali della laguna di Venezia (particolare). L'immagine è stata ottenuta con la sintesi additiva delle bande ETM 1 (0,45 ÷ 0,52 _m), ETM 2 (0,53 ÷ 0,61 _m), ETM 3 (0,63 ÷ 0,69 _m) esposte con i filtri del Blu, Verde e Rosso. Elaborazione dati Landsat 7 ETM 8 - settembre 2000

trale IKONOS che ha effettuato la copertura completa del bacino scolante nei mesi di giugno-luglio 2001.
L'analisi dei dati telerilevati ha permesso sia di monitorare fenomeni fisici e morfologici che si evolvono nel tempo, sia di documentare alcune specifiche emergenze ambientali (come, per esempio, l'ossidazione nel 1984 e nel 1988 di macroalghe con produzione di idrogeno solforato).

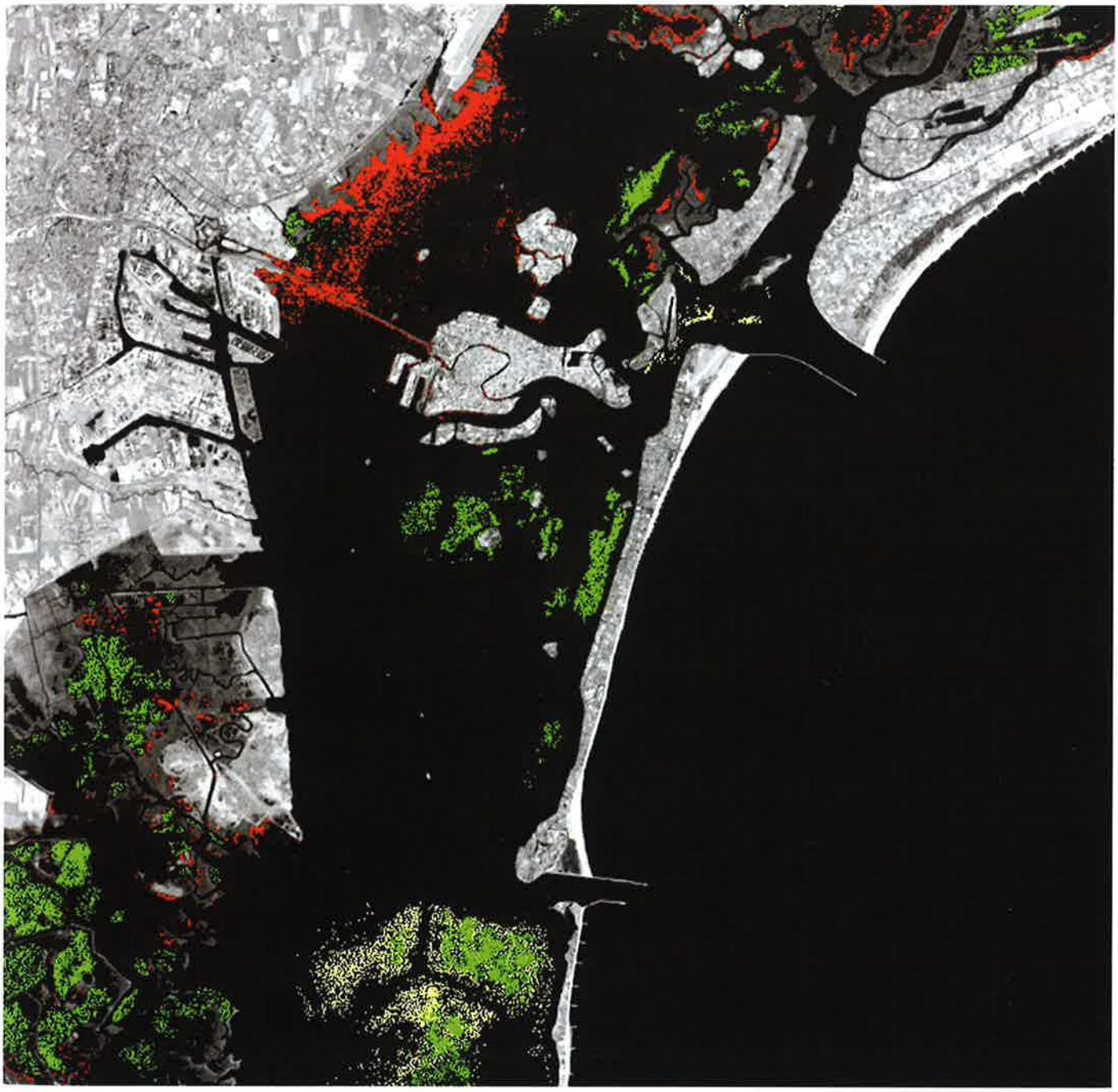
Rappresentazioni del territorio e mappe tematiche

L'archivio degli elaborati contiene attualmente un elevato numero di immagini a colori quasi naturali, che ritraggono il territorio in modo del tutto simile al prodotto di un apparecchio fotografico analogico. Questo risultato si ottiene utilizzando le bande del visibile e uno specifico software adatto alla gestione delle immagini per cui i dati vengono riscalati e visualizzati a colori. Nella figura 2 è riportata, a titolo di esempio, l'immagine della laguna di Venezia acquisita l'8 settembre 2000 col sensore Landsat ETM.
Numerose immagini a colori quasi naturali sono state georeferenziate[3] e vengono comunemente utilizzate in coppia con la cartografia vettoriale. Questi dati sono utilissimi quando si devono sovrapporre le informazioni cartografiche esistenti sul territorio a un'immagine della medesima area.
Alcune immagini dell'archivio sono state ottenute utilizzando sia il Landsat 5 TM (pixel di 30x30 m^2) sia il pancromatico dello SPOT (pixel di 10x10 m^2), ricampionando l'informazione multispettrale del primo sensore per raggiungere immagini a colori con la risoluzione geometrica del secondo. In passato, quando ancora i dati IKONOS non esistevano, questa tecnica ha permesso di raggiungere una buona risoluzione, consentendo di riconoscere numerose caratteristiche geometriche della scena (figura 3, a pagina 12).
L'archivio contiene anche numerose mappe tematiche, fondamentali per la gestione oculata dell'ambiente lagunare, ottenute dalle elaborazioni dei dati satellitari con l'obiettivo di monitorare lo stato ambientale della laguna. Uno dei principali esempi in questo senso sono le elaborazioni sullo stato trofico delle acque lagunari, per le quali gli indicatori ecologici più significativi sono, in particolare, le macroalghe (sintomo di instabilità del sistema) e le fanerogame (indice di stabilità). Il continuo monitoraggio della loro distribuzione (nello spazio e nel tempo) consente un immediato bilancio delle condizioni ambientali della laguna (figura 4, a pagina 13).
Un altro esempio di applicazione del telerilevamento per il monitoraggio ambientale è l'elaborazione di mappe tematiche relative alla temperatura dell'acqua, per le quali

[3] La georeferenziazione è la tecnica che permette di "registrare" le immagini rispetto al sistema geografico di riferimento prescelto, utilizzando alcuni punti di controllo (*GCPs = Ground Control Points*) scelti dall'operatore sull'immagine e corrispondenti a punti di coordinate note

Figura 3 (a lato). Confronto tra un'immagine Landsat 5 TM del 10 agosto 1998 relativa a Venezia (in alto) e un'immagine della stessa scena ricampionata utilizzando i dati SPOT del 24 luglio 1998 (in basso)

Figura 4 (nella pagina seguente). Mappa tematica della distribuzione, in laguna centrale, di macroalghe (in verde), fanerogame (in giallo) e fitoplancton (in rosso). Elaborazione dati Landsat 5 TM - 13 ottobre 1998



sono stati impiegati i sensori TM ed ETM dei satelliti Landsat. Questi infatti possiedono, come pochi altri sensori, una banda che cade nella regione spettrale dell'infrarosso termico (10,4 – 12,5 mm) che può essere utilizzata per individuare la temperatura delle superfici osservate (Mauser W. e Schneider K., 1996), pur con alcuni limiti. Da un lato, infatti, le informazioni estratte da questi dati sono affette da un errore (dell'ordine di ±1/1,5°) derivante dall'interferenza atmosferica; dall'altro lato i dati sono riferiti alla parte superficiale dei "bersagli" scelti, per uno spessore di pochi millimetri. Nella figura 5 sono riportate le temperature dell'acqua in laguna centrale derivanti dai dati TM del 15 febbraio 2001.

Le elaborazioni dei dati TM hanno permesso nel tempo di individuare anche fenomeni occasionali di degrado, in aree localizzate del bacino lagunare, come ad esempio la marcescenza delle macroalghe o la loro ossidazione con relativa produzione di idrogeno solforato (figura 6).

Numerose elaborazioni hanno contribuito, in particolare, all'analisi della morfologia lagunare e all'interpretazione delle dinamiche e dei processi in atto. Un parametro fondamentale adottato per questo tipo di studi è rappresentato dalla concentrazione dei solidi in sospensione nell'acqua. La distribuzione spazio-temporale dei sedimenti in laguna costituisce, infatti, un indicatore essenziale poiché fornisce informazioni e dati preziosi sui processi erosivi o di sedimentazione. In questo caso, il monitoraggio di tali fenomeni (che variano moltissimo in base a numerosi fattori quali la diversificata morfologia lagunare, le correnti di marea, il moto ondoso generato dai venti e dai natanti, ecc.) può essere effettuato utilizzando la risposta spettrale nell'intervallo di lunghezza d'onda che va da 0,6 a 0,8 mm[4] che in base a numerose ricerche (Li Xia, 1993) è risultato il più utile per individuare la presenza di sedimenti sospesi (figura 7, a pagina 16).

Sempre per quanto riguarda la morfologia lagunare, da diversi anni si è sperimentato l'impiego di immagini da satellite anche per caratterizzare l'evoluzione areale delle barene, in conseguenza di fenomeni di erosione o di sedimentazione. I confronti effettuati tra immagini TM acquisite a distanza di vent'anni hanno permesso di individuare, a grandi linee, le zone di barena in arretramento e quelle in accrescimento (figura 8, a pagina 17), integrando e completando i dati raccolti mediante le campagne di rilievo dirette che vengono effettuate nel corso del tempo nelle diverse aree lagunari. Mentre la risoluzione geometrica del sensore TM ha consentito, come si è detto, una stima generale dei processi in atto, più recentemente l'utilizzo dei dati

[4] Corrispondente alla banda 3 dei sensori Landsat TM ed ETM

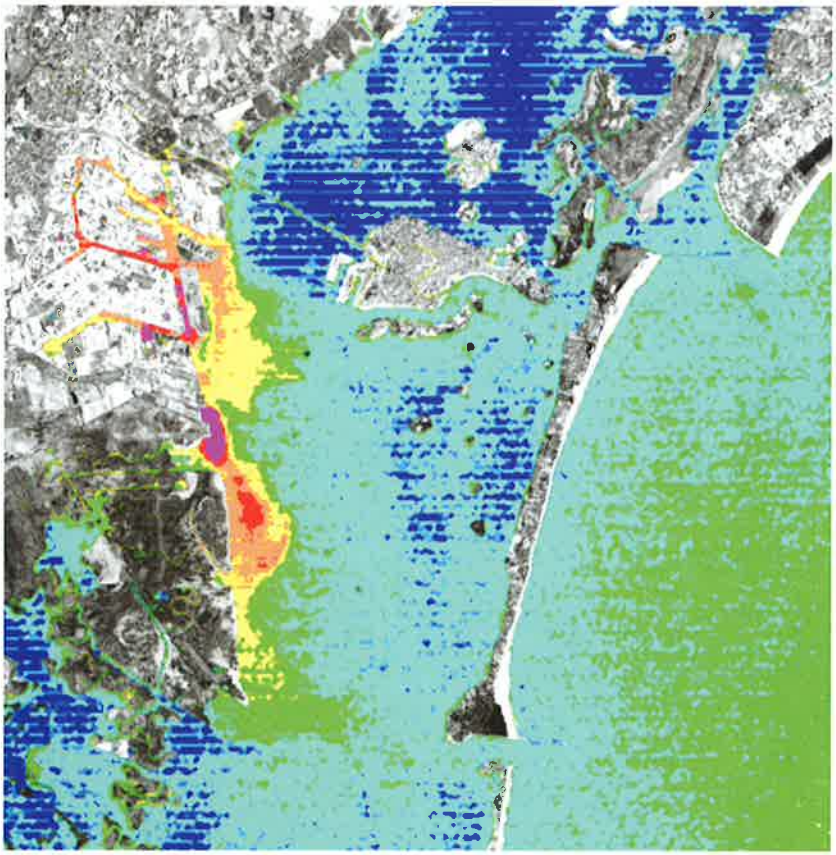


Figura 5. Mappa tematica della temperatura dell'acqua in laguna (particolare). È interessante notare come, in questa immagine invernale, le acque dei canali di Marghera abbiano una temperatura di 3-4° C maggiore della temperatura delle acque lagunari. In molte zone inoltre le acque della laguna risultano più fredde di quelle del mare. Elaborazione dati Landsat 5 TM - 15 febbraio 2001

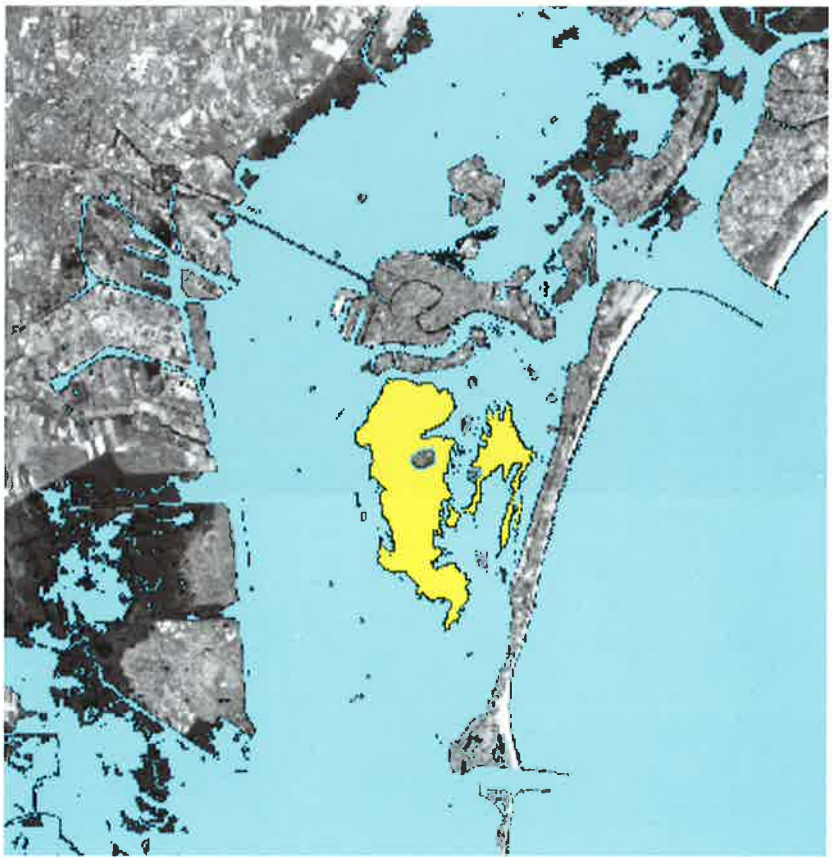
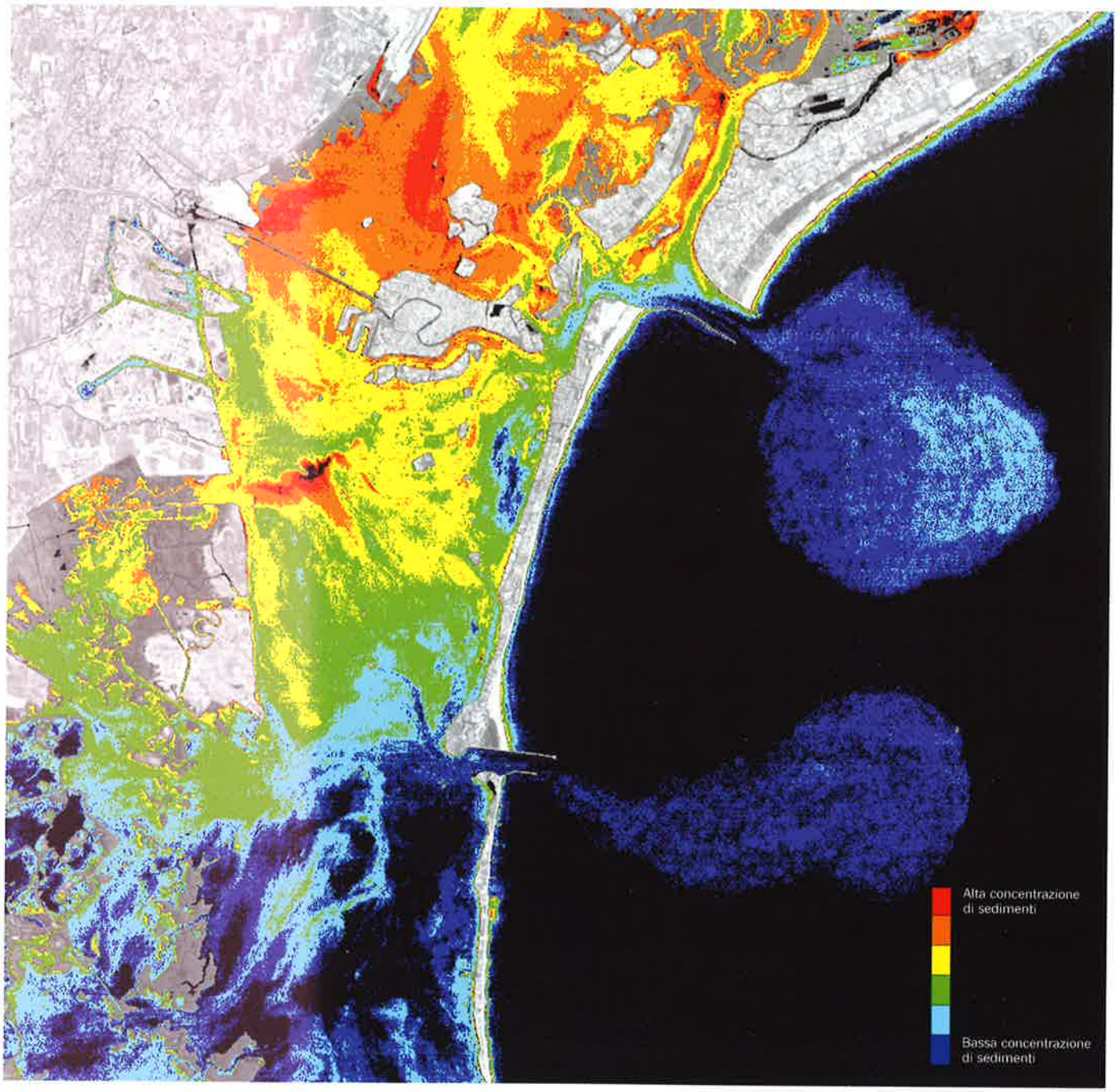


Figura 6. Mappa tematica della distribuzione di macroalghe ossidate con emissione di idrogeno solforato (in giallo). Elaborazione dati Landsat 5 TM - 3 agosto 1984


Alta concentrazione di sedimenti
Bassa concentrazione di sedimenti

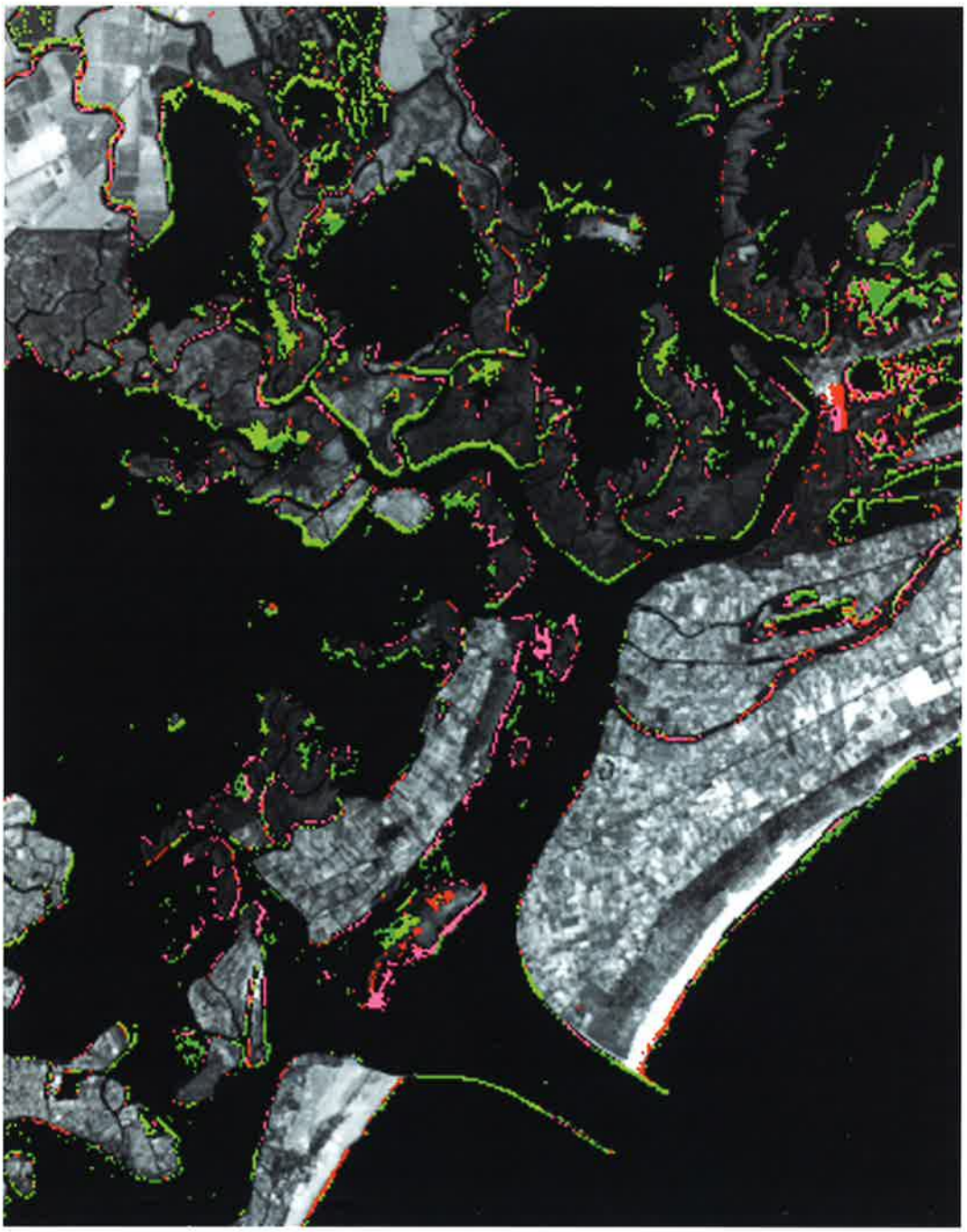


Figura 7 (a sinistra). Mappa tematica della distribuzione dei solidi in sospensione (particolare). La presenza di solidi in sospensione puo' essere causata sia dall'apporto di sedimenti dai fiumi (nel caso della figura la distribuzione visibile in laguna nord dipende soprattutto dai fiumi Osellino e Dese); sia dall'erosione di barene, velme e bassifondali a causa del moto ondoso, delle correnti e, anche, dall'attività di pesca. Nella parte destra dell'immagine sono chiaramente visibili i "plum" di sedimenti che escono dalle bocche di porto di Lido e Malamocco in fase di deflusso mareale. Elaborazione dati Landsat 5 TM - 10 agosto 1998

Figura 8 (a destra). Prima mappa tematica delle tendenze dei processi di erosione (verde chiaro e verde scuro) e sedimentazione (rosso e viola) nelle barene e velme della laguna tra il 1984 e il 1993 (particolare). L'elaborazione, a carattere sperimentale, evidenzia le zone naturali per le quali esiste una propensione misurata all'erosione o alla sedimentazione. La misura quantitativa dell'effettivo fenomeno avviene, invece, mediante periodici rilievi morfologici diretti

agosto 1984
aprile 1990

maggio 1990
maggio 1993

agosto 1984
aprile 1990

maggio 1990
maggio 1993

Figura 9 (in alto).
Barena San Felice (zona Treporti), immagine a colori quasi naturali.
Sintesi additiva delle bande 3 (0,473 ÷ 0,493 _m), 7 (0,553 ÷ 0,573 _m), 13 (0,673 ÷ 0,693 _m) esposte con i filtri del Blu, Verde e Rosso.
Elaborazione dati MIVIS - 18 settembre 1998

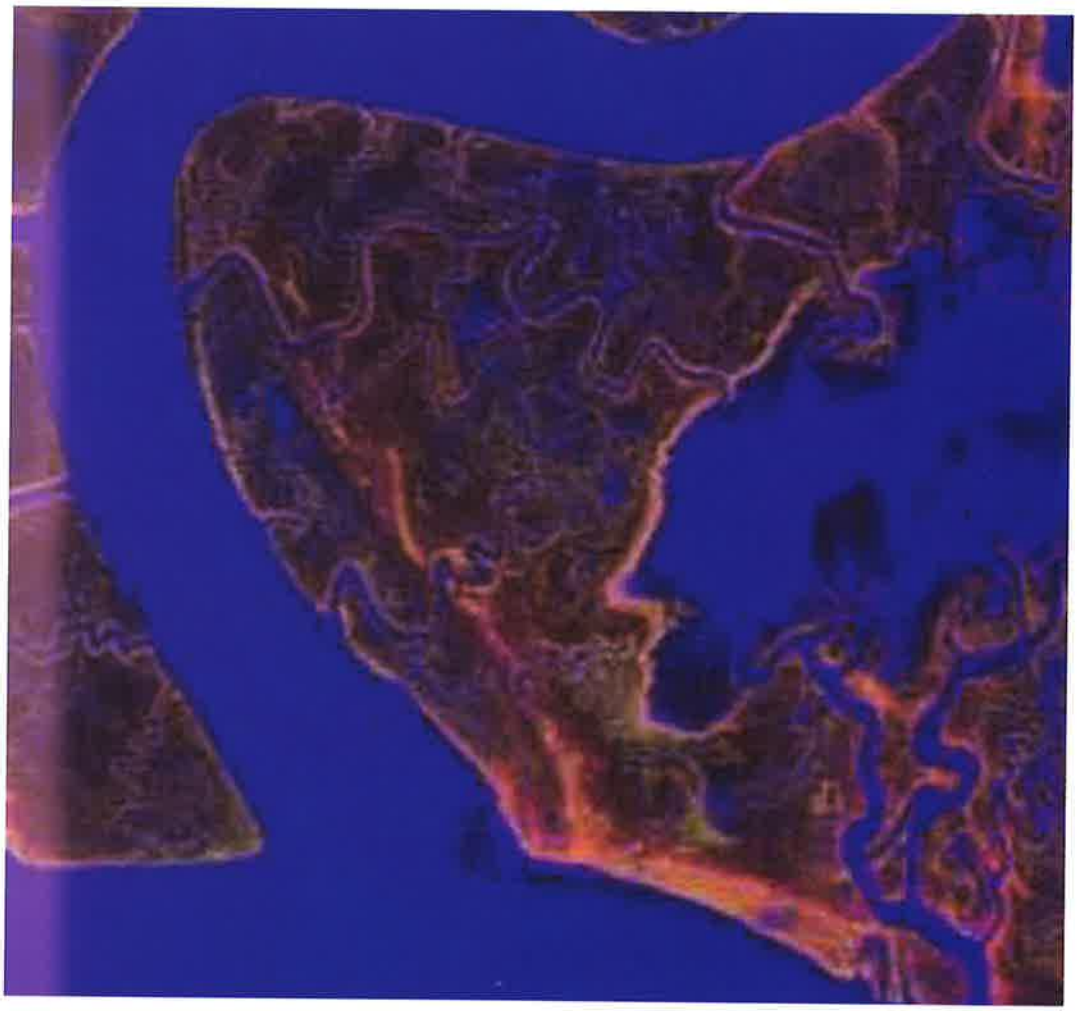


Figura 10 (al centro).
Barena San Felice (zona Treporti), rappresentazione delle zone vegetate (colore rosso).
Sintesi additiva delle bande 3 (0,473 ÷ 0,493 _m), 28 (1,500 ÷ 1,550 _m), 19 (0,793 ÷ 0,813 _m) esposte con i filtri del Blu, Verde e Rosso.
Elaborazione dati MIVIS - 18 settembre 1998

Figura 11 (in basso).
Barena San Felice (zona Treporti), immagine a colori quasi naturali.
Sintesi additiva delle bande MS-1 (0,445 ÷ 0,516 _m), MS-2 (0,506 ÷ 0,595 _m), MS-3 (0,632 ÷ 0,698 _m) esposte con i filtri del Blu, Verde e Rosso.
Elaborazione dati IKONOS - 26 giugno 2001

MIVIS (figura 9), ha semplificato l'individuazione delle barene anche grazie al riconoscimento della vegetazione alofila che ricopre le superfici e che è colorata di rosso nella figura 10. Lo studio dei dati MIVIS ha permesso di individuare in modo quantitativo la presenza delle varie specie vegetali, correlando tale informazione alle caratteristiche morfologiche del territorio barenale (Silvestri, 2000).
Con i nuovi dati IKONOS acquisiti negli ultimi mesi si conta di approfondire lo studio delle dinamiche morfologiche barenali, prendendo come indicatore proprio la vegetazione alofila, facilmente individuabile grazie alla banda che campiona nel vicino infrarosso. Il dettaglio possibile con IKONOS è evidente nella figura 11 dove è visualizzata la stessa porzione di barena rappresentata nella figura 9.

Analisi e monitoraggio della gronda lagunare
Metodi di classificazione degli "oggetti al suolo"

Fra le applicazioni delle tecniche di telerilevamento da piattaforme aero-spaziali, effettuate dal Servizio Informativo, rientrano anche le mappe di uso del suolo (o classificazione delle diverse tipologie tematiche) della gronda lagunare.
I metodi utilizzati dagli esperti per il riconoscimento automatico di un oggetto da un'immagine, come, appunto, le classi di uso del suolo, sono noti con il nome di "metodi di classificazione" o "classificatori".
Nel settore del telerilevamento, questi metodi sono stati studiati e messi a punto a partire dagli inizi degli anni settanta con le immagini del sensore MSS del primo satellite Landsat. Le caratteristiche tecniche di tale sensore satellitare (tre bande spettrali nel visibile e una nell'infrarosso vicino) e la risoluzione a terra del pixel acquisito (79 m x 79 m), risultavano utili per la produzione di cartografie con una scala non superiore a 1:100.000.
Basandosi sulle caratteristiche tecniche del sensore, i classificatori proposti erano essenzialmente "per punti": ogni pixel (singola unità di territorio riconosciuto) veniva assegnato a una classe tematica in modo indipendente dai pixel adiacenti nell'immagine acquisita. Questo avveniva grazie a due specifiche tecniche: una funzione discriminante e una regola di decisione[5].
Con l'aumento della risoluzione spaziale del pixel nei sensori di telerilevamento è migliorata la possibilità di discriminare tra diversi "oggetti al suolo", ma è anche cresciuta la difficoltà di riconoscimento. Potrebbe sembrare paradossale che all'aumentare della risoluzione (e quindi della verosimiglianza fotografica dell'elaborazione satellitare del territorio rilevato) diminuisca la riconoscibilità automatica degli oggetti territoriali. In realtà, poiché con la maggior definizione aumenta anche il numero di pixel

[5] Le funzioni discriminanti più utilizzate all'epoca erano la "multinormata di Gauss-Laplace" e la "distanza Euclidea generalizzata"; le regole di decisione più utilizzate erano quelle della "massima verosimiglianza" e della "minima distanza"

che "rappresentano" un oggetto, se volessimo per esempio evidenziare una piazza, essa ci apparirebbe al video di un computer come un insieme di pixel di diversi colori e non più, come nei sensori meno definiti, come una macchia di pochi pixel di identiche tonalità, più grandi e più immediatamente riconoscibili.
I sensori TM e HRV permettono potenzialmente di riconoscere un numero di "oggetti al suolo" superiore al sensore MSS. Tali oggetti, però, possono non coincidere con specifiche categorie di uso del suolo, ma essere dovuti a "variabilità del suolo" nell'ambito di ciascuna categoria. Questa variabilità, che può essere osservata sia nelle immagini a colori quasi naturali che in quelle nell'infrarosso colore, è dovuta a diversi fattori fisici come, per esempio, le differenze del colore o dell'umidità dei suoli, le variazioni di altezza e di densità delle piante.
Per queste ragioni vi è stato un cambiamento nella strategia di classificazione e si sono introdotte, nei metodi di classificazione, anche informazioni sul "contesto spaziale del pixel", inteso come relazione spaziale di ciascun pixel con quelli adiacenti. Tornando all'esempio della piazza si può dire che poiché è impossibile che tutti i pixel che identificano la piazza siano dello stesso colore e poiché è verosimile che alcuni insiemi di pixel, sia per adiacenza geometrica che per associazione di tonalità, siano riconducibili a un unico elemento geometrico, si assume che la piazza sia identificabile con quell'insieme di pixel e che il metodo sia espandibile su tutta l'immagine acquisita.
Per la complessità nell'implementazione e le successive proposte di utilizzare metodi di intelligenza artificiale nel riconoscimento automatico, pochi classificatori contestuali sono stati implementati sui sistemi tradizionali di analisi delle immagini.
Il classificatore utilizzato per produrre le mappe del Servizio Informativo è quello di Swain P. H. et al., 1980. La strategia si basa sulla stima della funzione di distribuzione multivariata del "contesto spaziale del pixel". Sulla base di numerose esperienze effettuate, il classificatore permette di ridurre la variabilità entro una specifica classe e classi diverse risultano più correttamente differenziate.
Queste mappe sono ottenute con procedure di riconoscimento automatico e restituite sotto forma di immagini, con sfondo in bianco e nero e classi tematiche e tipologiche in colori codificati. Da tali mappe possono essere estratte automaticamente le forme geometriche (le zone di competenza) delle classi tipologiche, usando funzioni di conversione che permettono la trasformazione da formato immagine a formato geometrico nel sistema informativo territoriale del Servizio Informativo.

Per la produzione delle mappe di classificazione vengono utilizzate: immagini del satellite Landsat 5 con sensore TM e rilievi al suolo resisi disponibili in campagne opportunamente svolte. Le mappe sotto forma di immagine e in rappresentazione vettoriale, ottenute dall'elaborazione dell'immagine TM acquisita il 5 luglio 1999, sono riportate nelle figure 12 e 13 a pagina 22.

I programmi futuri
Acquisizione
di informazioni
quantitative

Le numerose mappe tematiche realizzate in questi anni hanno permesso di descrivere molti fenomeni in termini per lo più qualitativi. Il nuovo obiettivo del Servizio Informativo è quello di estrarre dai dati telerilevati informazioni di tipo quantitativo. Dopo aver provato, ad esempio, che è possibile individuare la presenza di macroalghe usando i dati TM, è oggi importante indagare la possibilità di quantificarne la biomassa. Ciò vale anche per altri parametri come la densità vegetativa delle alofite in barena, la concentrazione di solidi in sospensione, ecc. Questo nuovo approccio necessita innanzitutto di informazioni ancillari acquisite a terra, possibilmente in contemporanea alla ripresa del sensore remoto, che vanno utilizzate per tarare i metodi di analisi.

Correzione
e calibrazione dei dati

Un grosso sforzo va inoltre effettuato per correggere i dati dagli effetti atmosferici, che interferiscono con i risultati. Le onde elettromagnetiche che giungono al suolo interagiscono con l'atmosfera terrestre, e in modo particolare con i gas (anidride carbonica, ossigeno, ozono, ecc.), il vapor d'acqua e le polveri fini che in essa si trovano. Questa interazione dipende sia dalla lunghezza del percorso che l'onda compie prima di giungere al sensore, sia dalle condizioni climatiche e meteorologiche del luogo osservato. La correzione atmosferica rende gli spettri dei "bersagli" rilevati in remoto confrontabili con quelli rilevati da altri sensori remoti, e con quelli rilevati in loco da strumenti portatili. L'operazione è pertanto fondamentale se si desidera confrontare immagini rilevate sulla stessa scena ma in tempi diversi, oppure immagini rilevate da due o più sensori. L'operazione può inoltre permettere la creazione di una libreria spettrale che, definite le caratteristiche di ciascun bersaglio, ne raccolga la firma spettrale (corrispondenza tra un elemento e l'intervallo di frequenze che gli è proprio e che ne consente il riconoscimento). Tale libreria può essere usata per il riconoscimento dei bersagli all'interno di immagini raccolte sulla stessa area geografica ma in tempi diversi, oppure su aree geografiche diverse ma dove vi siano bersagli analoghi.
Le nuove collaborazioni instaurate dal Servizio Informativo con l'Università di Padova (Dipartimento IMAGE) e con l'Università di Venezia (Dipartimento di Scienze

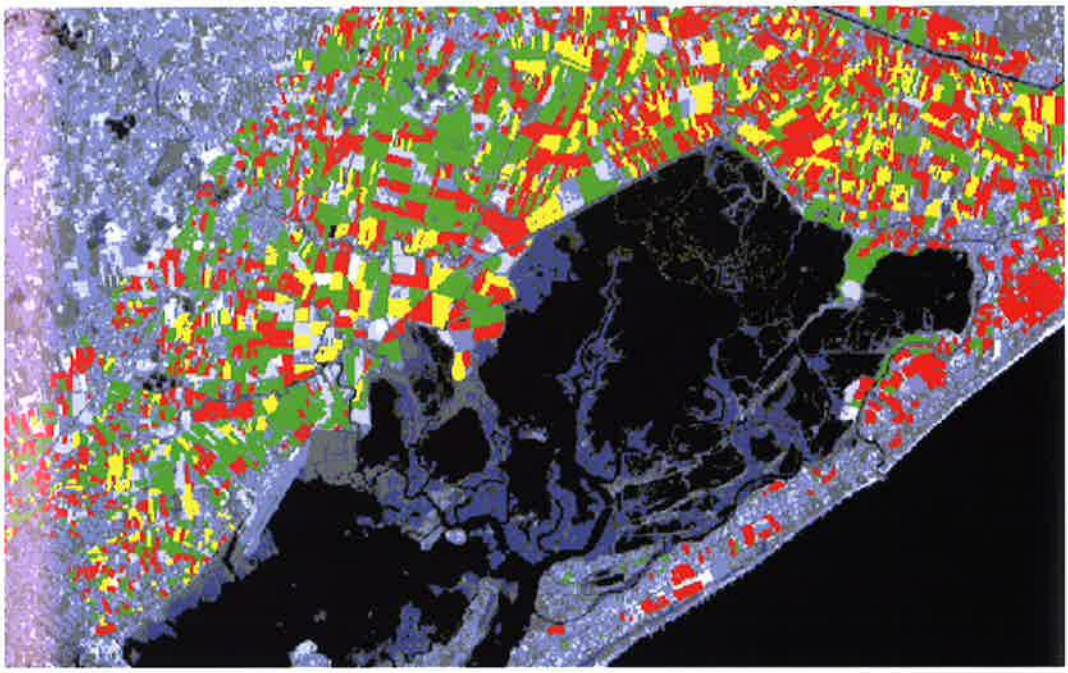


Figura 12. Classificazione tematiche delle specie soia (in giallo), mais (in rosso) e colture foraggiere (in verde) Per i tipi di rilievi effettuati e la risoluzione del sensore utilizzato, che permette di ottenere mappe a scala non superiore a 1:50.000, le classi di uso del suolo estratte nell'immagine si sono limitate alle specie sopra indicate. Al momento dell'acquisizione dell'immagine, il frumento era già stato mietuto. Elaborazione dati Landsat 5 TM - 5 luglio 1999

Figura 13. Trasformazione dei dati immagine in dati geometrici relativi all'uso del suolo: da essi è possibile trarre informazioni sia qualitative che quantitative e correlarli alle altre informazioni cartografiche relative al territorio analizzati

Ambientali) hanno fruttato, negli ultimi mesi, un cospicuo finanziamento da parte della Comunità Europea, da dedicare interamente al telerilevamento. Questi contributi permetteranno di acquistare vari strumenti portatili (radiometri, fotometri, ecc.) che serviranno per la calibrazione dei dati acquisiti dai sensori remoti. Grazie, inoltre, a un accordo effettuato nel luglio 2001 con la direzione dell'Aeroporto Marco Polo e con quella delle Aeronavali, sarà possibile accedere, durante le campagne, a vaste aree aeroportuali utilizzabili per le calibrazioni. Il posizionamento, sempre a Tessera, di un fotometro che acquisisce dati in automatico, strumento fondamentale per le misure di spessore ottico atmosferico, completerà il quadro di dati ancillari da usare nelle calibrazioni dei dati telerilevati.
Grazie agli sforzi impiegati per l'organizzazione di questo grande progetto sul telerilevamento, si prevede che le future campagne di misura effettuate con sensori satellitari e aerotrasportati possano, finalmente, produrre risultati quantitativi, attendibili e confrontabili con le misure in loco.

Nota bibliografica

Benvenuto F., Marani A., Marani M., Settle J., Silvestri S., 2002. "Salt marsh vegetation radiometry: data analysis and scaling". *Remote Sensing of Environment.* In press.

Lechi G., 1997. *Dispense del corso di Telerilevamento*, Facoltà di Ingegneria, Milano, 389p.

Li Xia, 1993. "A united model for quantitative remote sensing of suspended sediment concentration". *Int. J. Remote Sensing*, vol. 14, no. 14, 2665-2676.

Macaluso L., 1999, *Analisi geoambientale di un territorio della bassa pianura veneta: Sezione 127140 'Mira Taglio' – Geomorfologia, geolitologia, geopedologia e idrogeologia*, Tesi di Laurea, Università Ca' Foscari, Facoltà di Scienze Ambientali, Venezia.

Mauser W. e Schneider K., 1996. "Processing and accuracy of Landsat Thematic Mapper data for lake surface temperature measurement". *Int. J. Remote Sensing*, vol. 17, no. 11, 2027-2041

Silvestri S., 2000. *La vegetazione alofila quale indicatore morfologico negli ambienti a marea.* Tesi di Dottorato in Modellistica dei Sistemi Ambientali, Università di Padova.

Siegal H. J., Smith B. W., Swain P. H., 1980, *Contextual classification of multispectral remote sensing data using a multiprocessor system*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-18.

Zandonella A., 1985, *Contextual classification procedures of multispectral image data: a survey.* AICOGRAPHICS Symp., Milano.