

## **Il progetto SIMS (Seagrass Integrated Monitoring System) per il monitoraggio della POSIDONIA OCEANICA nel Mediterraneo**

Flavio Borfecchia<sup>1</sup>, Carla Micheli<sup>2</sup>, Luigi De Cecco<sup>1</sup>, Sandro Martini<sup>1</sup>, Giulio Ceriola<sup>3</sup>,  
Stelios Bollanos<sup>4</sup>, George Vlachopoulos<sup>4</sup>, Luigi M. Valiante<sup>5</sup>, Eugenio Fresi<sup>6</sup>

<sup>1-2</sup> ENEA – Unità UTME-TER, Unità UTRINN-BIO

<sup>3-4</sup> Planetek-Italia, Planetek-Hellas

<sup>5-6</sup> ECON-Napoli, Dip. Ecologia Università Tor Vergata (ROMA)

ENEA – UTME-TER – UTRINN\_BIO

C.R. Casaccia, Via Anguillarese 301 - 00123 Roma

Tel.: 06.3048.6042 - Fax: 06.3048.6038 - e-mail: borfecchia@casaccia.enea.it

### **Riassunto**

Quantunque già da tempo le missioni di telerilevamento satellitare supportino notevolmente gli studi oceanografici con l'osservazione e l'analisi delle superfici marine, per il monitoraggio operativo degli ecosistemi costieri, costituiti da vegetazione foto-sintetica sommersa nei bassifondali, si richiedono risoluzioni spaziale e radiometrica che solo i sensori più recenti sono in grado di assicurare (IKONOS, Chris-Proba, Quick-Bird, World-View, ...). D'altra parte oggi questi elementi chiave dell'ambiente marino che mantengono la catena trofica garantendo allo stesso tempo la stabilità delle coste, risultano notevolmente vulnerabili e sotto stress per il notevole impatto antropico continuamente crescente a cui si vanno ad aggiungere gli effetti dovuti ai cambiamenti climatici in atto, con eventuali implicazioni di rilievo anche dal punto di vista della loro gestione sostenibile. Il progetto SIMS, finanziato dall'ESA (European Space Agency) si prefigge la messa a punto di metodologie di monitoraggio e mappatura delle piante fanerogame marine, costiere tramite dati telerilevati derivanti dalle tecniche più recenti di Osservazione Aerospaziale (E.O.) della terra. Le metodologie messe a punto sono finalizzate a supportare operativamente sia le pubbliche amministrazioni che le imprese nelle proprie attività istituzionali di gestione e monitoraggio degli ecosistemi vegetali costieri (seagrass), in particolare quelli relativi alla POSIDONIA OCEANICA (P.O.) che, a livello nazionale (in Italia è localizzato il 40% della P.O. distribuita nei vari stati dell'U.E.) e dell'intero bacino del Mediterraneo risulta tra le specie più importanti. Le campagne di calibrazione pianificate e condotte su siti costieri selezionati della costa Tirrenica e dell'arcipelago del mar Egeo in sincronia con i passaggi satellitari, vedono l'impiego di tecniche avanzate per le indagini in sito che includono non solo misure di parametri biofisici significativi delle piante (densità, LAI, biomassa, ...) ma anche le loro caratteristiche genetiche, che sono state utilizzate diffusamente nel sito tirrenico di S. Marinella, in particolare anche per il monitoraggio di trapianti di P.O. effettuati anni fa con tecniche innovative.

### **Abstract**

*Though the polar satellite Earth Observation (E.O.) missions are yet supporting since various decades oceanographic studies with sea surface and colour observation, the effective monitoring of coastal ecosystems, mainly constituted by seagrass photo-synthetic vegetation growing in shallow waters sea bottom, requires spatial and radiometric resolutions of the more recent sensors (IKONOS, Chris-Proba, Quick-Bird, World-View,...). On the other hand these key-elements of the marine environment which maintain the productivity chain while guarantee the coastal stability against the erosion, are threatened and under stress due to human impact continuously rising and*

*on going climate change, with potential effects on their sustainable management . The SIMS project, funded by ESA (European Space Agency) aims at implementing innovative methodologies for mapping and monitoring seagrass ecosystems, in particular POSIDONIA OCEANICA (P.O.), which at national level ( in the Italian coast shallow waters are localized more than 40% of European P.O. beds) and in the Mediterranean basin is one of the most important species. The calibration campaigns were planned and carried out on selected sites of Tyrrhenian and Aegean coasts according to polar satellites overpasses and by means of advanced techniques for on site acquirement and subsequent laboratory analysis of samples. In fact they include non only the usual plants bio-physical parameters (LAI, biomass,...) measurements but also their genetics characteristics, which were widely used in the site of S. Marinella, in particular for monitoring the P.O. innovative transplantations previously introduced here.*

## **Introduzione**

La vegetazione rappresenta un elemento chiave degli ecosistemi marini sebbene oggi in molte aree costiere in varie zone della terra la sua distribuzione risulta in declino a causa sia dell'impatto delle varie attività antropiche sia degli effetti dei cambiamenti climatici in atto. Le varie specie di vegetazione costiera, in particolare la P.O., sono notevolmente importanti per il loro fondamentale ruolo ecologico connesso alla riduzione dell'erosione costiera con l'attenuazione dell'impatto del moto ondoso, al sequestro dei sedimenti sospesi ed il conseguente miglioramento della trasparenza, al mantenimento della catena trofica e dell'habitat per una molteplicità di organismi alla base anche di attività con valenze economiche legate alla pesca ed al turismo. La P.O., che nel Mediterraneo è tra le più importanti specie per la varietà e l'estensione delle sue praterie, appare sempre più a rischio con la riduzione significativa delle sue estensioni in varie aree e l'aumento della vulnerabilità a stress derivanti sia da variazioni di parametri ambientali ( torbidità, temperatura, acidità, salinità,...) che di eventi legati ad attività antropiche ( pesca, lavori costieri connessi ad infrastrutture, nuovi insediamenti,...). Da questo punto di vista essa costituisce anche un sensibile bio-indicatore della qualità dell'ambiente marino costiero adatto a supportare l'introduzione di eco innovazione nei processi produttivi e lo sviluppo di politiche di gestione ecosostenibile. L'Italia è caratterizzata da oltre 7400 Km di costa lungo la quale si trova oltre il 40% delle praterie di P.O. dell'intero bacino del Mediterraneo in cui l'aumento della pressione antropica per lo sfruttamento delle risorse richiede preventivamente un monitoraggio estensivo alle diverse scale spazio-temporali e con strumenti innovativi a sostegno della gestione sostenibile di questi ecosistemi. In questo contesto i sistemi aerospaziali di Earth Observation (E.O.) forniscono un contributo rilevante specialmente con l'utilizzo dei sensori e missioni più recenti o di quelli che si prevede di rendere operativi nell'immediato futuro dotati di caratteristiche di risoluzione spaziale-spettrale e radiometrica unitamente a capacità di rivisitazione adeguate alle esigenze specifiche. Sebbene già da decenni le missioni di telerilevamento satellitare operanti a scala sinottica (AVHRR, MERIS, SeaWiFS,...) supportino efficacemente gli studi oceanografici con canali e risoluzioni spettrali in grado di rilevare efficacemente il "colore" del mare da cui, in base ad algoritmi consolidati, è possibile derivare distribuzioni d'importanti variabili geo-biofisiche come SST (Sea Surface Temperature) o CHL (Chlorophyll), la loro risoluzione spaziale intorno al chilometro risulta fortemente limitante per la caratterizzazione degli ecosistemi costieri. Infatti tali sensori malgrado la loro indubbia utilità per la caratterizzazione della circolazione e delle variabili geo-bio fisiche a scala regionale ed in mare aperto purtroppo risultano meno adeguati per l'analisi degli ecosistemi costieri in termini di stima dei parametri biofisici sia di qualità dell'acqua sia dell'eventuale vegetazione presente sui bassi fondali, caratterizzata da distribuzioni con patch di dimensioni tipiche della decina di metri. D'altronde negli ultimi anni, nel settore del telerilevamento passivo multi/iperspettrale, sono stati resi operativi sistemi per telerilevamento satellitare (IKONOS, Chris-Proba, Quick-Bird, World-View,..) ed aereo. con caratteristiche avanzate di canali di acquisizione,

risoluzione spaziale/spettrale e radiometrica in grado di rispondere più adeguatamente a queste esigenze, tenuto conto anche della loro maggiore flessibilità nei tempi di rivisitazione dovuta alla capacità di orientamento dei sensori.

## Il Progetto

In questo contesto il progetto SIMS è stato finanziato dall'ESA, nell'ambito del suo programma E.O.E.P. (Earth Observation Envelope Program: line 1 - Improved E.O.-based information content), dedicato a supportare l'integrazione delle nuove tecniche innovative di E.O. nei servizi operativi finalizzata al miglioramento delle informazioni a vantaggio delle imprese e delle utenze istituzionali pubbliche e private, con l'intento di supportare così lo sviluppo del mercato in questi settori strategici ad alta tecnologia. Gli obiettivi principali del progetto attengono pertanto l'implementazione di metodologie basate sulle tecnologie telerilevamento aerospaziale più recenti per il monitoraggio estensivo e la mappatura della vegetazione dei bassi fondali, in particolare la P.O., e dei suoi parametri biofisici in differenti zone costiere Europee e del bacino del Mediterraneo. Il consorzio, formato oltre che dall'ENEA dalla Planetek-Hellas EPE, una società privata Greca attiva nei settori dello sviluppo di applicazioni basate sui dati di E.O., si propone di sviluppare applicazioni avanzate mirate a soddisfare le esigenze di un'utenza diversificata integrando differenti tecnologie ed informazioni per produrre mappe di distribuzione dei parametri d'interesse con livello di accuratezza compatibile con i nuovi dati di E.O.

*Tabella 1 – Utenza con relative attività e siti d'interesse.*

TIPOLOGIA/NOME	ATTIVITA'	SITI
ECON s.r.l. Impresa privata (Profit) (IT)	Progetti di ripristino e rinaturalizzazione di siti costieri (trapianti P.O.,...)	S. Marinella (1)
MINISTERO dell'AMBIENTE (IT) (No-Profit) P.A. Nazionale	Controllo e monitoraggio ecosistemi marini	SiDiMar Geodata-Base nazionale marino
AGENZIA REGIONALE (IT) Roma Natura (No-Profit) P.A. Locale	Monitoraggio e gestione vegetazione costiera e P.O., gestione sostenibile	Tor Paterno (2), Monterosso a mare (3)
ARCHIPELAGOS, ONG (GR) Environment and marine research (No-Profit)	Ricerca e monitoraggio ecosistemi e P.O.	Arkoi island (4)



*Figura 1 – Siti d'interesse del progetto SIMS.*

Nella Tabella 1 sono riportate le varie istituzioni rappresentative delle diverse tipologie d'utenza coinvolte nel progetto con le relative attività istituzionali e siti d'interesse, mappati nella successiva Figura 1. Come si vede i potenziali utenti delle metodologie e prodotti implementati sono diversificati con attività e siti d'interesse che riguardano varie aree del Mediterraneo sia sulla costa Tirrenica che nell'Egeo caratterizzate da zone climatiche e situazioni relative all'impatto antropico

differenti. La società ECON s.r.l. che implementa progetti di rinaturalizzazione costiera utilizzando anche trapianti di P.O. con tecniche innovative, è interessata alla messa a punto di metodologie di mapping tramite tecniche di E.O. al fine di supportare adeguatamente le varie fasi progettuali che prevedono anche controlli successivi di dettaglio sulle aree costiere oggetto degli propri interventi. Per quanto riguarda il Ministero dell’Ambiente Italiano l’interesse è focalizzato sulle eventuali metodologie messe a punto per assicurare l’aggiornamento delle proprie banche-dati a livello nazionale, in particolare di quella denominata SiDiMar relativa alle informazioni marine, tra cui la distribuzione della P.O. sull’intera costa italiana. Le altre utenze richiedono metodologie in grado di assicurare una mappatura di dettaglio delle distribuzione dei vari parametri biofisici d’interesse relativi agli ecosistemi vegetali costieri, in particolare la P.O., ottimizzando e minimizzando i dispendiosi rilievi puntuali in situ.

**Prelaborazione dei dati di E.O.**

La stima della distribuzione della vegetazione marina sommersa nei bassi fondali costieri risulta ardua e dispendiosa in relazione anche ai livelli di accuratezza da raggiungere. Le tecniche tradizionali, basate su prospezioni marine per mezzo d’immersioni subacquee da parte di operatori supportati da battelli in superficie e mezzi vari, possono fornire informazioni dettagliate su aree di limitata estensione ma risultano inadeguate per misure estensive su larghi tratti costieri che tipicamente comportano alti costi e risorse spesso non disponibili. Soluzioni valide a questi problemi sono offerte da metodologie basate su rilevamenti satellitari ed aerei, che comunque oltre al supporto di adeguate misure in situ per la calibrazione e la verifica dei modelli impiegati hanno necessità di procedure di “preprocessing” efficaci per minimizzare gli effetti di rumore introdotti oltre che dall’atmosfera anche dalla colonna d’acqua soprastante. In questo contesto infatti, uno dei fattori limitanti ulteriori rispetto alle applicazioni terrestri, è costituito dall’effetto di attenuazione introdotto dalla colonna d’acqua soprastante sui dati di riflettanza rilevati dai sensori remoti ed associati alle caratteristiche dei fondali. Tale attenuazione in prima approssimazione può essere

descritta dal coefficiente  $k$  [ $m^{-1}$ ] nella seguente formulazione [Dekker A.G. et al., 2005, Pahlevan N. et al., 2006]:

$$R_i = R_{wi} + a r_i \exp(-k_i b z) \quad (1)$$

dove:

$R_i$  = la radianza/riflettanza alla superficie acquatica,  
 $R_{wi}$  = la radianza/riflettanza derivante dal contributo atmosferico e della colonna d’acqua pari a  $[1 - \exp(-k_i b z)] R_{wie}$  (riflettanza dell’acqua profonda  $\geq$  estinzione),  $a$ =coefficiente che tiene conto della trasmittanza atmosferica ed all’interfaccia aria-acqua e dell’irradianza solare,  
 $k_i$ =coefficiente di attenuazione della luce in acqua,  $b$ = fattore relativo alla geometria del cammino ottico

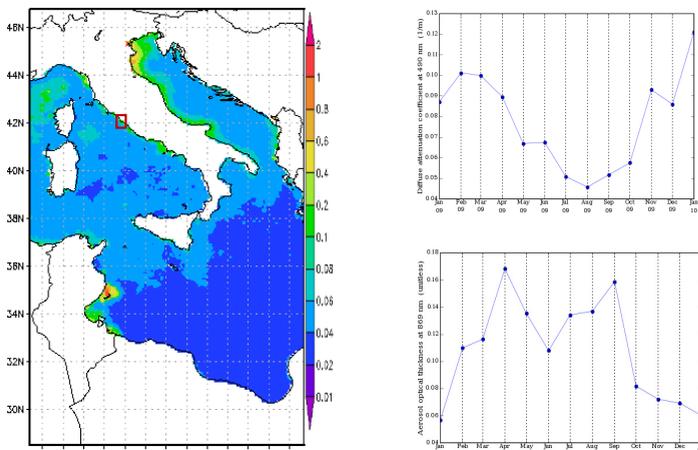


Figura 2 – Distribuzione media annuale del coefficiente di attenuazione  $k$  [ $m^{-1}$ ] in acqua a 490 nm. (sinistra) ed andamento temporale (destra-alto) delle sue medie mensili sul sito di S. Marinella(box con margine rosso a destra). Medie mensili di trasparenza atmosferica AOT (Aerosol Optical Thickness) sullo stesso sito (destra basso). Le informazioni precedenti sono state ricavate da dati di E.O. MODIS.

in acqua,  $r_i$  = riflettenza della copertura del fondale,  $z$  = profondità in m della colonna d'acqua (batimetria),  $i$  indice relativo alla banda spettrale.

La trasparenza della colonna d'acqua alle varie frequenze d'interesse, tipicamente collocate nel range del visibile, è determinata dai vari parametri di qualità dell'acqua (sedimenti, CHL, DOM) correlati con processi costieri come la circolazione locale, le maree, la presenza di sbocchi di corpi d'acqua come fiumi o canali e molti altri fenomeni di origine naturale ed antropica che ne influenzano significativamente la variabilità spazio-temporale (Figura 2). Come si vede la trasparenza diminuisce in zone costiere e con l'aumento della latitudine unitamente ad un andamento parzialmente stagionale e correlato al carico di aerosol atmosferico.

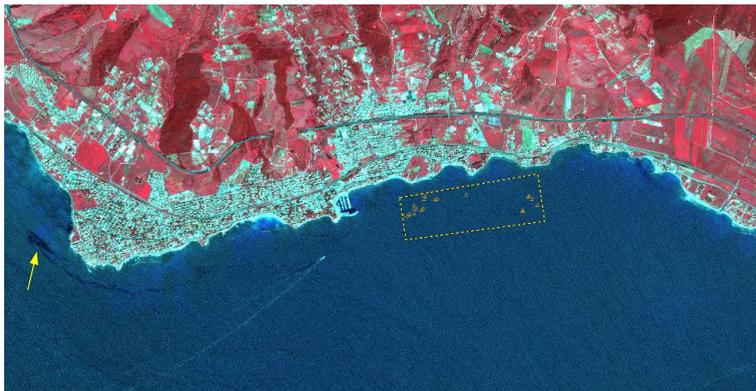
Dalla (1) linearizzando tramite i logaritmi l'espressione suddetta e separando il termine  $ar_i$ , dipendente esclusivamente dalle proprietà di riflettenza del fondale a cui siamo interessati, abbiamo:

$$\ln(R_i - R_{wie}) - k_i bz = \ln(ar_i - R_{wie}) \quad (2)$$

per cui presupponendo condizioni di trasparenza omogenee, conoscendo la batimetria e ricavando i termini  $R_{we}$  (selezione in area di profondità maggiore di quella di estinzione) e  $k_i$  (tramite best-fit regressivo) dall'immagine multispettrale stessa su punti di profondità nota e tipologia omogenea è definibile una correzione relativa al contributo della colonna d'acqua. Laddove invece manchino informazioni batimetriche, con la stessa finalità è comunque possibile un approccio basato sull'algoritmo di Lyzenga [Pahlevan N. et al., 2006] che utilizza le risposte in 2 bande di ripresa diverse per ottenere un indice spettrale relativo alla sola riflettenza del fondale su cui basare la

discriminazione ed il monitoraggio delle varie tipologie di copertura vegetale.

Nel seguito sono riportati i risultati preliminari ottenuti sinora per il sito di S. Marinella in cui nel periodo primaverile scorso sono stati effettuati dei rilievi su praterie di P.O. alcune delle quali anni fa erano state interessate da trapianti. In data 10 Aprile 2010 tenendo conto della sincronia con le misure a mare è stata



*Figura 3 – Immagine Quick-Bird grezza in falsi colori dell'area d'interesse con l'indicazione delle stazioni di misura (triangoli in giallo vuoti) del 2010 riportate sull'area di dettaglio (riquadrata a tratto giallo) mappata durante i trapianti.*

acquisita un'immagine satellitare (multispettrale+pancromatico) Quick-Bird (2.5 m. g.r.), da utilizzare per la messa a punto e la validazione della metodologia.

L'immagine grezza geometricamente corretta, in combinazione a falsi colori (bande:4,2,1) in Figura 3, abbraccia un'estensione di litorale di circa 10 km e riporta l'indicazione delle stazioni di rilievo (simboli triangolari in magenta). In essa si evidenzia inoltre la presenza di un'imbarcazione e relativa scia con probabili sversamenti di idrocarburi nella zona costiera a sinistra (freccia gialla).

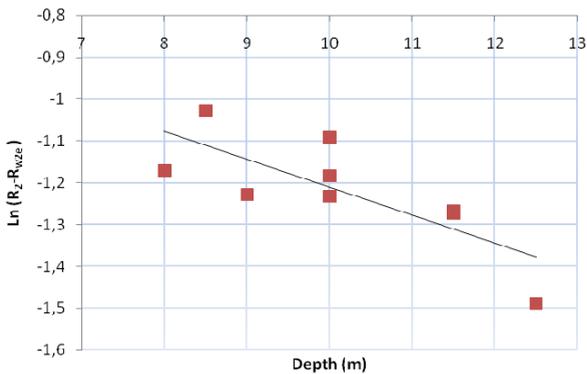


Figura 4 – Stima del termine relativo al coefficiente  $k_2$  per la banda n. 2 (verde) di Quick-Bird.

Regressione:  $y = -0.0672x - 0.5389$ ,  $R^2 = 0.601$ .

sotto forma di nuvola di punti nel GEO-database SiDiMar, dai quali tramite interpolazione con algoritmi di Kriging si è ottenuto uno strato informativo continuo calibrato successivamente sui rilievi batimetrici più recenti in corrispondenza dei campionamenti di P.O. del 2010.

Selezionando dagli stessi punti di rilievo quelli maggiormente omogenei in termini di copertura della P.O. (densità) sono stati stimati i termini contenenti i coefficienti di attenuazione  $k_i$  per ogni banda di acquisizione (Figura 4) che sono serviti successivamente alla correzione colonnare sull'intero tratto costiero d'interesse. La valutazione del fattore  $R_{wie}$  è stata effettuata sulla stessa immagine con l'ausilio della batimetria precedentemente interpolata. La stessa metodologia è in corso di utilizzazione per l'altra area test di Monterosso a mare, mentre per il sito greco di Arkoi, non disponendo di una batimetria affidabile si sta procedendo con il metodo di Lyzenga [Pahlevan N. et al., 2006]. Preventivamente alla correzione batimetrica è stato applicato l'usuale algoritmo COST [Wu et al. 2005] per la riduzione degli effetti atmosferici mentre quelli relativi al moto ondoso superficiale sono stati trattati con filtri passa-basso utilizzando la trasformata di Fourier con frequenza di taglio derivata dalle dimensioni massime delle onde presenti (200 m). Tale metodo è risultato maggiormente efficace tra quelli preliminarmente testati. E' stata infine effettuata la selezione dei soli pixel relativi alla superficie acquatica tramite soglia nel canale IR (banda 4) al fine di ottimizzare le successive operazioni di classificazione dei fondali.

## Risultati e conclusioni

Nell'Aprile 2010 nel sito di S. Marinella è stata effettuata la campagna di misure a mare sulle praterie di P.O. precedentemente individuate. Le misure, consistenti sia in parametri misurati direttamente in sito sia in prelievi di campioni per analisi di laboratorio successive, sono state condotte su 20 stazioni con campionamenti su base statistica organizzati in plot di 1 m<sup>2</sup>. Tra i vari parametri biofisici misurati in sito e qui considerati oltre alla profondità (batimetria) figurano in particolare: la densità in ciuffi (shoots)/m<sup>2</sup>, la copertura e l'indice di Giraud.

Il primo è relativo alla concentrazione dei ciuffi, buoni indicatori dello stato di eventuale stress, che costituiscono le parti deputate all'accrescimento della pianta dalle quali si sviluppano i fasci fogliari. La copertura si riferisce invece alla percentuale di area occupata dalla vegetazione all'interno dei plot. L'indice di Giraud è relativo invece alla densità dei fasci fogliari articolata in 5 classi, dalla I (oltre 700 fasci/m<sup>2</sup>) a V (da 50 a 150 fasci/m<sup>2</sup>). Al fine di implementare un modello previsionale regressivo basato sui dati di riflettanza, in corrispondenza dei punti di misura (Figura 3), sono state estratte le relative firme spettrali derivate dalle immagini multispettrali Quick-Bird preelaborate. Al fine di migliorare il rapporto segnale/rumore i valori di riflettanza locale nelle

Nell'immagine si notano anche rilevanti increspature superficiali dovute al moto ondoso che costituiscono un rumore aggiuntivo rilevante al segnale d'interesse relativo alla vegetazione del fondale.

I rilievi del 2010, localizzati col supporto di tecniche GPS ed effettuati su base statistica, hanno riguardato una serie di parametri biofisici (profondità, densità, ..) e fenologici (biometria foglie e struttura,..) delle praterie con prelievi anche di campioni per analisi di laboratorio successive.

Per la batimetria dell'intera area si è partiti dai dati non aggiornati disponibili

quattro bande di ripresa nel visibile ed IR, sono stati calcolati come medie in un intorno corrispondente a 3x3 pixel centrato sul punto di misura a mare. Tale metodo ci ha permesso di ottenere come ulteriori variabili anche le relative deviazioni standard, direttamente connesse alla tessitura locale, per un totale di 8 variabili radiometriche di base direttamente derivate dai dati di

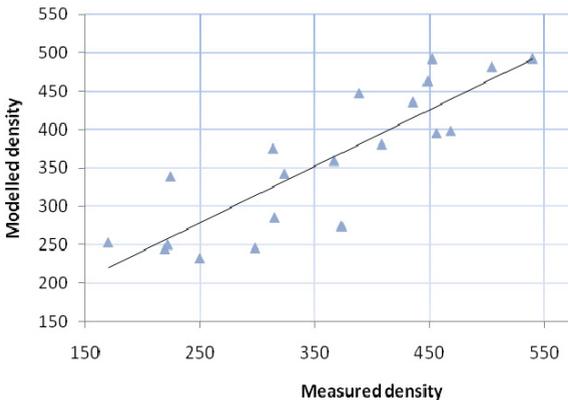
Attribute	Coef.	std	t(10)	p-value
Intercept	6391,067758	4079,94	1,56646	0,14831
depth	-71,386203	23,6513	-3,0183	0,01293
b1	143026,6784	71778,6	1,99261	0,0743
sd1	-180590,9222	90650,4	-1,9922	0,07435
b2	-63398,19345	33204,7	-1,9093	0,0853
sd2	-148083,9381	88541,2	-1,6725	0,12538
sd3	305442,2612	83687,8	3,64978	0,00446
b2/b1	7828,656103	3324,95	2,35452	0,04033
b3/b1	-12800,32831	5703,31	-2,2444	0,04864
NDG2	-26594,07534	12363,3	-2,151	0,05696

E.O.. I valori di riflettanza estratti sono stati poi combinati in forma di indici (b3/b1, b2/b1, b2/b3) anche normalizzati (NGD1,2) per ottenere 5 variabili aggiuntive. E' stata adottata quindi una metodologia di "stepwise-regression" per l'identificazione delle variabili più significative nella modellizzazione della densità misurata (Densità), includendo anche la profondità (batimetria).

Tabella 1 – Stepwise-regression: var. dip: Density (shoot/m<sup>2</sup>), 14 variabili indipendenti.

L'importanza delle variabili indipendenti nel modello è indicata del valore decrescente del p-value (corrispondente

all'intensità dell'evidenziatura). In particolare nella Tabella 1 a sinistra ( risultato della stepwise-regression) si nota il peso maggiore della tessitura rilevata in banda 3 (sd3) rispetto a quello della batimetria (depth) che comunque presenta un importanza maggiore rispetto ai valori estratti di riflettanza (b1, b2,...) ed agli indici spettrali (b2/b1, b3/b1,...).Il modello lineare multivariato finale è stato quindi implementato utilizzando le 3 variabili più significative così individuate, nell'ordine:



	Coefficiente	Errore Std.	rapporto t	p-value
const	622,743	192,619	3,2330	0,00520 ***
depth	-43,4999	8,20146	-5,3039	0,00007 ***
sd3	202512	59687,9	3,3928	0,00372 ***
b2/b1	54,724	70,9103	0,7717	0,45152
Media var. dipendente	359,2500	SQM var. dipendente	106,2174	
Somma quadr. residui	56743,79	E.S. della regressione	59,55239	
R-quadro	0,735288	R-quadro corretto	0,685655	
F(3, 16)	14,81436	P-value(F)	0,000070	

Tabella 2 –Parametri e grafico (a sinistra) del modello della densità (shoots/m<sup>2</sup>) multivariato finale (3 variabili).

sd3, depth, b2/b1.

Un incremento significativo del coefficiente R<sup>2</sup> (>0,8 )del modello si ottiene, escludendo le misure relative a plot con indice di copertura basso (<4) la cui eventuale differenza di riflettanza dei substrati potrebbe perturbare le relative risposte.

Test ulteriori sono stati effettuati al fine di stimare le distribuzioni delle classi di Giraud nell'area d'interesse oggetto dei rilievi a mare. Tenendo conto della natura categorica dell'indice legato al LAI (Leaf Area Index) che presuppone una dipendenza non lineare dai segnali di riflettanza derivati dalle tecniche di E.O., sono stati utilizzate reti neurali ANN (Artificial Neural Networks) in grado di approssimare relazioni di questo tipo senza ipotesi stringenti sulla loro forma analitica. E' stata effettuata uno primo test che ha consentito di eliminare le variabili meno significative del modello sulla base della loro importanza calcolata, successivamente ci si è attestati su un set di 10 variabili

in input con una topologia indicata in Figura 4, che ha permesso di stimare la distribuzione di Figura 5, sulla base di un training effettuato con le misure delle 20 stazioni stabilizzatosi dopo circa 2000 cicli di apprendimento.

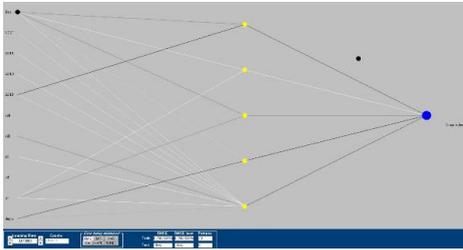


Figura 4 – Multilayer Perceptron ANN. Backpropagation learning (~ 2000 cicli). Topologia della rete ANN: input 10 (radiometriche, batimetria), hidden 5, output 1 (indice di Giraud).

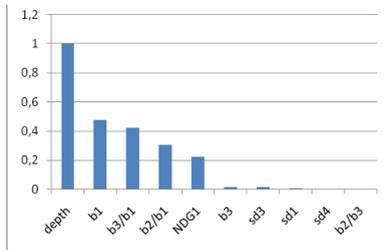


Figura 6 – Peso relativo delle variabili di input nel modello ANN finale.



Figura 5 – Distribuzione dell'indice di Giraud nell'area dei rilievi (triangoli gialli) stimata tramite l'utilizzo di dati E.O. e reti neurali (ANN).

In Figura 6 è riportato il peso relativo nel modello ANN finale delle variabili in input. Come si vede la batimetria continua a giocare un ruolo essenziale ma cambiano le variabili legate alla riflettanza rispetto alla stima della densità effettuata precedentemente, che risulta un parametro meno legato alla struttura della pianta. Per una verifica ulteriore compatibilmente con le misurazioni disponibili è

stato elaborato un ulteriore modello ANN, addestrato solo con il 50% dei dati rilevati scelto casualmente, mentre la restante parte dei rilievi è stata utilizzata per la sua validazione, con risultati incoraggianti (accuratezza > 75%).

Al fine di verificare la possibilità di utilizzo dei dati di E.O. preelaborati per l'aggiornamento del geo-database Si.Di.Mar, d'interesse nazionale abbiamo preliminarmente operato con tecniche di classificazione "unsupervised", tramite l'algoritmi di "ISODATA" e successivamente clustering mediante ML(Maximum Likelihood), per ottenere una mappa sulla base di 10

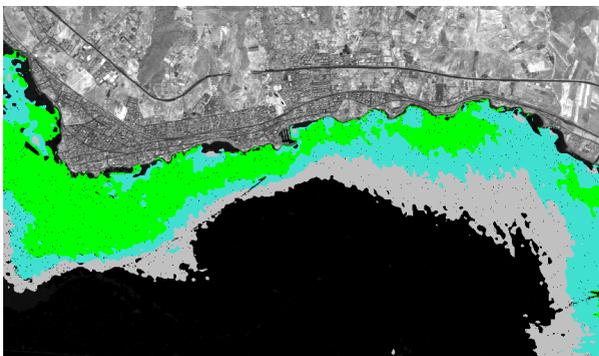


Figura 7 – Classificazione unsupervised di multi spettrale Quick-Bird dell'Aprile 2010 preprocessata.

classi di riflettanza spettrale poi raggruppate adeguatamente tenendo conto delle distribuzioni non aggiornate presenti nel database. In Figura 7 è riportata la distribuzione nell'intera area d'interesse delle varie tipologie di P.O. (verde:su roccia, celeste: degradata, grigio:matte) ottenuta tramite classificazione



Figura 8 – Distribuzione P.O. nel database Si.Di.Mar.

unsupervised dell'immagine multi-spettrale Quick-Bird preventivamente elaborata come descritto in precedenza. Tale risultato va confrontato con i dati non aggiornati presenti in Sio.Di.Mar riportati in figura 8, nella quale compaiono classi aggiuntive in viola relative aree da mappare ed in verde scuro coperte da vegetazione non vitale (matte-morte). In ogni caso preliminarmente le due distribuzioni appaiono in sufficiente accordo, ma risultano necessari ulteriori rilievi per mettere a punto la procedura.

In conclusione dai risultati preliminari qui presentati appare che i dati multispettrali ad alta risoluzione ripresi dai sensori satellitari operativi possono dare un contributo rilevante al monitoraggio e mappatura degli ecosistemi vegetali costieri. L'alta risoluzione spaziale ha permesso la stima di parametri legati alla tessitura delle coperture vegetali sommerse che sono risultati poi determinanti nella modellizzazione delle variabili biofisiche d'interesse. Rimane determinante la messa a punto di accurate procedure di preprocessing efficaci per la depurazione dei deboli segnali provenienti dai bassi fondali costieri. Nella scelta dell'acquisizione è necessario tener conto non solo di condizioni di trasparenza atmosferica e della colonna d'acqua ma anche del moto ondoso superficiale e della posizione del sole che è auspicabile sia nadirale per una miglior penetrazione in acqua.

## **Bibliografia**

Arnold G. Dekker, Vittorio Ernesto Brando, Janet M. Anstee  
RETROSPETTIVE SEAGRASS CHANGE DETECTION IN A SHALLOW COASTAL TIDAL AUSTRALIAN LAKE

Remote Sensing of Environment 97 (2005), 415-433

Jindong Wu, Dong Wang, Marvin E. Bauer  
IMAGE-BASED ATMOSPHERIC CORRECTION OF QUICK-BIRD IMAGERY OF MINNESOTA CROPLAND

Remote Sensing of Environment 99 (2005), 315-325

N. Pahlevan, M. J. Valadanzouj., A. Alimohamadi.  
A QUANTITATIVE COMPARISON TO WATER COLUMN CORRECTION TECHNIQUES FOR BENTIC MAPPING USING HIGH SPATIAL RESOLUTION DATA  
ISPRS Commission VII Mid-term Symposium "Remote Sensing: From Pixels to Processes", Enschede, the Netherlands, 8-11 May 2006.