

## INTEGRAZIONE GEOSTATISTICA TRA DATI DI CAMPO ED IMMAGINI SATELLITARI MULTI SPETTRALI PER IL RILIEVO BATIMETRICO IN AMBIENTI DI ACQUE BASSE

Giuseppe RASPA (\*), Carlo INNOCENTI (\*\*), Andrea TARAMELLI (\*\*)(\*\*\*),

(\*) Università "Sapienza" di Roma, Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali, Ambiente.  
Via Eudossiana 18 I -00184 Roma

(\*\*) ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. Via di Casalotti, 300 – 00166 Roma

(\*\*\*) Lamont Doherty Earth Observatory of Columbia University, New York, USA

### Riassunto

In questo lavoro è stata valutata quantitativamente l'integrazione di dati IKONOS, esenti per loro natura dai problemi di acquisizione legati alla bassa profondità del fondale relativa ai *multibeam*, con un numero ridotto di dati batimetrici rilevati sul campo. I dati disponibili hanno permesso di effettuare correlazioni e l'analisi variografica dei vari set di dati tramite tecniche statistiche multivariate. E' stata inoltre misurata l'influenza della profondità sulla correlazione spaziale tra le quote del fondale marino e le varie bande spettrali e sono state testate alcune metodologie geostatistiche che hanno permesso di stimare la batimetria a partire da un sottoinsieme dei dati *multibeam*, utilizzando i dati spettrali come variabili ausiliarie.

### Abstract

Many tools exist for determining and mapping the bathymetry of shallow water. However, these tools often require time-consuming survey work to produce accurate maps. In particular, the large quantity of data necessary may be prohibitive for projects where determining bathymetry is not a central focus, but instead a necessary step in achieving some other goal. We present a method to produce bathymetric surface maps with a minimum amount of effort using an integration of IKONOS satellite data and multibeam bathymetry. We also demonstrate that this method is surprisingly accurate, given the small amount of data we use to generate the bathymetry maps.

### Introduzione

Le indagini batimetriche in ambienti di acque profonde sono oggi condotte quasi esclusivamente con strumentazione *multibeam*. Questa strumentazione permette di misurare la profondità molto fittamente in tutto il campo di indagine riducendo od eliminando la necessità di stimare la profondità nei punti non campionati.

Negli ambienti di acqua bassa tuttavia la produttività di tali strumenti si riduce notevolmente ed al di sotto di un certo battente d'acqua essi non possono operare. Se poi quelli indagati sono ambienti lagu-

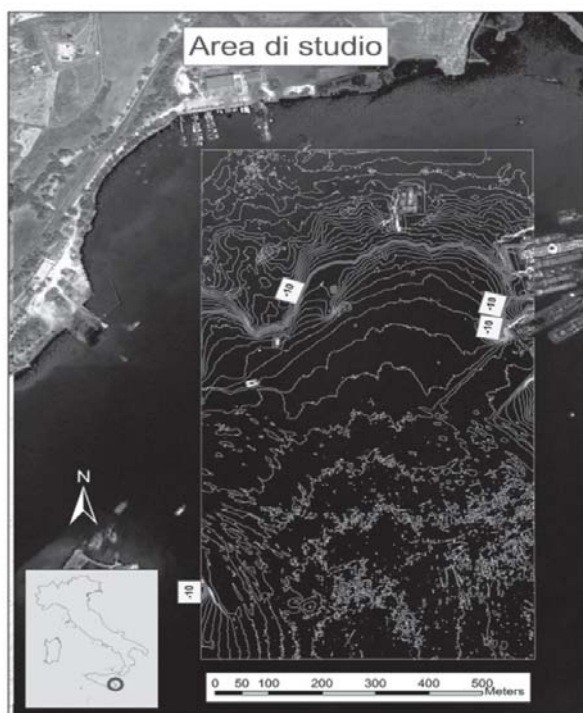


Figura 0: Area di studio

nari, allora alla complessità vanno aggiunte le difficoltà di navigazione, l'estrema eterogeneità dei fondali e la mutevolezza dell'ambiente.

Lo scopo di questo studio è quello di investigare la possibilità di utilizzo delle immagini satellitari per integrare un numero ridotto di misure, eseguite con strumentazione *single beam*, per la stima della batimetria in ambienti di acqua bassa e lagunari.

Per questo studio è stata individuata un'area marina di circa 71 ha all'interno della Rada di Agusta con fondali compresi tra 20 m e 1.5 m di profondità (Figura 0). I dati utilizzati sono: *multibeam* su una griglia di celle 1x1 e immagine Ikonos nella banda del visibile e dell'infrarosso vicino (4 bande con risoluzione del pixel 4x4 m).

### Metodologia

Come primo passo i dati di batimetria, su griglia 1x1 m, sono stati mediati su celle di dimensione 4x4 m per unificare il supporto con quello delle immagini Ikonos. Per analizzare l'influenza del battente d'acqua sulla correlazione tra bande e batimetria i dati sono stati divisi in cinque classi di profondità: (20 -16.5m; 16.5 - 15.7 m; 15.7 - 14.3 m; 14.3 - 7.5 m; 7.5 - 1.5 m) contenenti ciascuna circa 8700 valori, e per ciascuna sono state calcolate le correlazioni. I risultati mostrati in Figura 1 mostrano come le correlazioni siano trascurabili per le profondità maggiori, ma come diventino

	Blu	NIR	Rosso	Verde	Batimetria
Profondità 20 -16.5m					
Blu	1	0.3	0.21	0.28	-0.09
NIR	0.3	1	0.3	0.39	0.15
Rosso	0.21	0.3	1	0.16	-0.17
Verde	0.28	0.39	0.16	1	0.12
Batimetria	-0.09	0.15	-0.17	0.12	1
Profondità 16.5 -15.7m					
Blu	1	0.48	0.07	0.47	0.02
NIR	0.48	1	0.08	0.59	0.24
Rosso	0.07	0.08	1	0.07	0.01
Verde	0.47	0.59	0.07	1	-0.01
Batimetria	0.02	0.24	0.01	-0.01	1
Profondità 15.7 -14.3m					
Blu	1	0.36	0.29	0.42	0.22
NIR	0.36	1	0.24	0.64	0.25
Rosso	0.29	0.24	1	0.22	-0.01
Verde	0.42	0.64	0.22	1	0.32
Batimetria	0.22	0.25	-0.01	0.32	1
Profondità 14.3 -7.5m					
Blu	1	0.64	0.55	0.76	0.52
NIR	0.64	1	0.55	0.84	0.47
Rosso	0.55	0.55	1	0.55	0.35
Verde	0.76	0.84	0.55	1	0.62
Batimetria	0.52	0.47	0.35	0.62	1
Profondità 7.5 -1.5m					
Blu	1	0.63	0.85	0.94	0.83
NIR	0.63	1	0.84	0.66	0.49
Rosso	0.85	0.84	1	0.88	0.74
Verde	0.94	0.66	0.88	1	0.9
Batimetria	0.83	0.49	0.74	0.9	1

molto forti per le classi a profondità minore. In particolare, nella classe meno profonda, le correlazioni maggiori si riscontrano per la banda del verde e quella del blu, rispettivamente 0.9 e 0.83.

Dopo questa prima analisi lo studio si è focalizzato sulle profondità minori di 10 m.

In questa fascia di profondità è stato tenuto conto del rumore di fondo presente in una immagine multispettrale. Tale rumore è definito come la deviazione standard della riflettanza di un settore omogeneo di acque che può variare, ad esempio, in presenza di moto ondoso. Per poter eliminare tale rumore un filtro passa - basso  $5 \times 5$  è stato applicato a tutte le 4 bande dell'IKONOS. L'immagine risultante è stata calcolata per capire la precisione e l'accuratezza per la stima dei parametri batimetrici. Il filtro ha prodotto una immagine che ha come effetto la riduzione del contrasto, con un valore medio di riflettanza di 0.0017.

La Figura 2 mostra gli *scatter plot* tra batimetria e bande che evidenziano una relazione di tipo non lineare.

Nella Figura 3 sono riportate le mappe delle 4 bande. Vi si nota nella parte centrale un ampio buco di informazione dovuto alla presenza di ostacoli.

Tutte e quattro le mappe evidenziano macroscopicamente due tipi di variabilità:

- delle strutture a piccola scala dell'ordine dei 10-20 metri che appaiono più accentuate nelle bande del blu e dell'infrarosso vicino;
- un *trend* avente pressappoco lo stesso andamento della batimetria che è più evidente nelle mappe del verde e del rosso.

Figura 1: Correlazioni Bande - Batimetria

La variabilità spaziale di un parametro  $Z(x)$  è, come è noto, evidenziata e quantitativamente espressa dalla funzione geostatistica variogramma  $\gamma$ . Quest'ultima, per una coppia di punti nello spazio  $x$  e  $x+h$ , distanti  $h$ , è definita (Matheron, 1975; Chiles, Delfiner, 1999) come la semivarianza del corrispondente incremento della variabile in funzione della distanza:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x+h)-Z(x)] \quad [1]$$

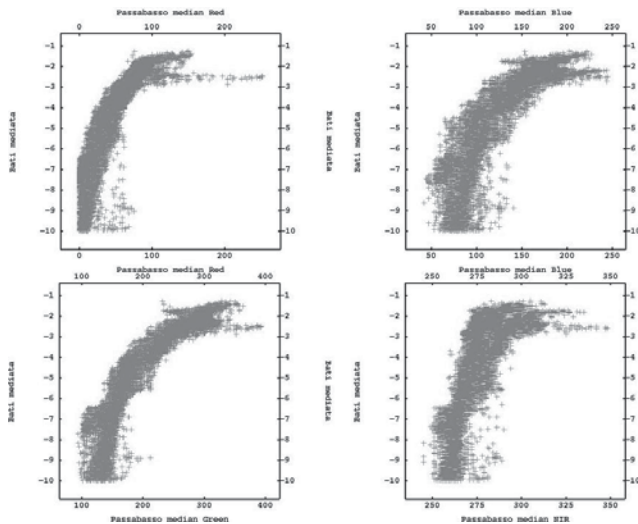


Figura 2: Scatter Plot tra batimetria e bande

Si è appena visto che le variabili oggetto dello studio, sia la batimetria che i *serial number*, presentano un *trend* molto netto e questo, in termini geostatistici, è il segno di una sistematica variazione della media  $E[Z(x)]$ , che non può essere considerata costante nemmeno localmente. In geostatistica la funzione che descrive l'andamento (non costante) di  $E[Z(x)]$  è normalmente chiamata *drift*. Il termine *trend* si usa più specificamente per indicare una sua progressiva variazione, come nel presente caso.

Quando  $E[Z(x)]$  non può essere considerata costante, nemmeno localmente, la funzione  $\gamma(h)$  diviene:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E\{[Z(x+h)-Z(x)]^2\} - \frac{1}{2} \{E[Z(x+h)-Z(x)]\}^2 \quad [2]$$

Per tale motivo i variogrammi sperimentali calcolati coi dati grezzi (Figura 4) non stimano il variogramma di  $Z(x)$ , ma il primo termine di destra dell'espressione precedente, cioè la somma del variogramma di  $Z(x)$  e del quadrato dell'incremento del *trend*, quest'ultimo senz'altro dominante sul primo. L'andamento simile dei suddetti variogrammi indica comunque che le bande esibiscono un *trend* riconducibile a quello della batimetria.

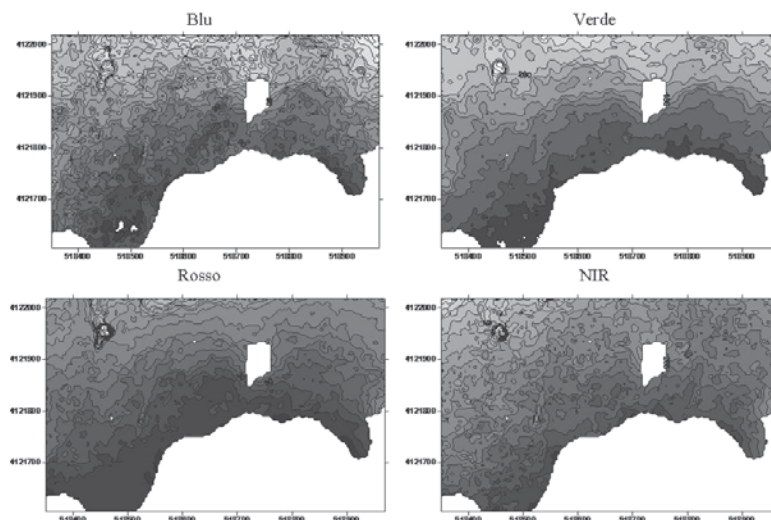


Figura 3: bande Ikonos

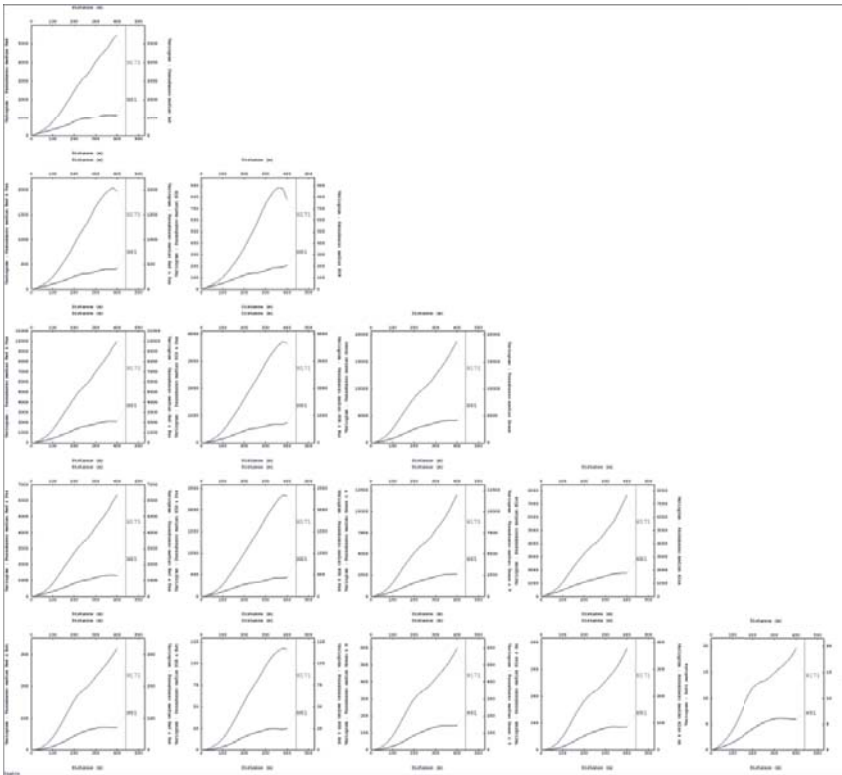


Figura 4: Variogrammi diretti ed incrociati (Lungo la diagonale dall'alto al basso NIR, RED, GREEN, BLUE e Batimetria)

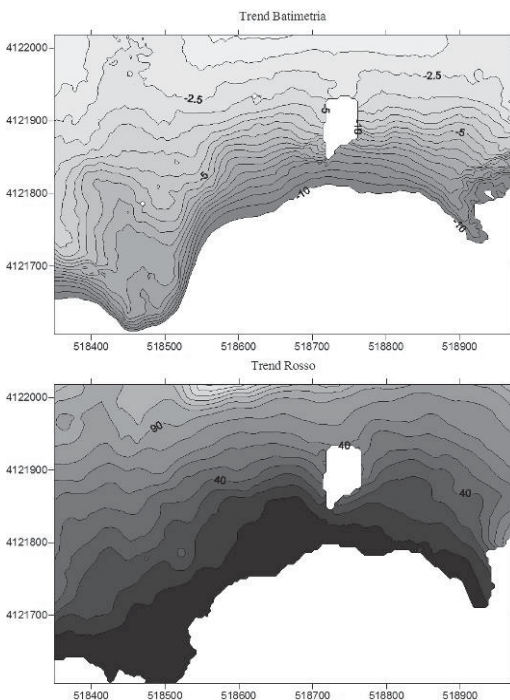


Figura 5: trend di batimetria e banda rosso

Le metodologie geostatistiche, in particolare la stima del *drift* mediante kriging (Chilès, Delfiner, 1999; Wackernagel, 2003), consentono di stimare e quindi di cartografare, nel nostro caso, il *trend*. Nella Figura 5 sono riportate le mappe della batimetria, che noteremo  $B(x)$ , e del *trend* di una delle bande (il rosso) che indicheremo con  $m_r(x)$ . E' stata scelta la banda del Rosso unicamente a titolo di esempio.

I valori delle variabili, depurati dal loro *trend*, sono chiamati residui e i loro variogrammi modellizzano la parte aleatoria della variabilità. Quando i residui sono, come sempre accade, il risultato di una stima (la stima del *trend*) i variogrammi sono distorti e la distorsione li rende difficilmente interpretabili e modellizzabili.

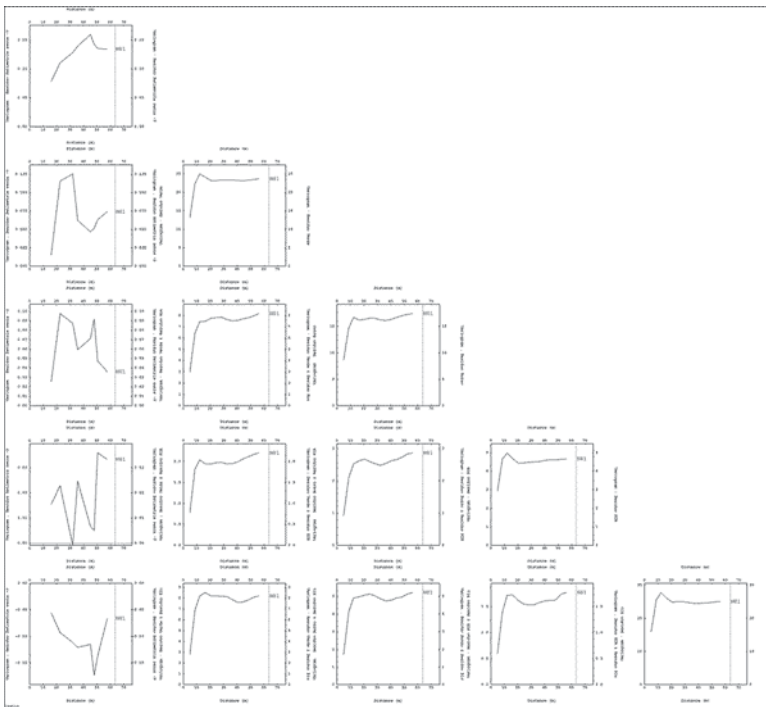


Figura 6: Variogrammi diretti ed incrociati dei residui (Lungo la diagonale dall'alto al basso NIR, RED, GREEN, BLUE e Batimetria)

Nel presente caso invece i variogrammi dei residui sia della batimetria che delle quattro bande (Figura 6) non evidenziano la tipica distorsione dei residui sperimentali che normalmente si presenta come un allontanamento progressivo dal variogramma vero. Il motivo è da attribuirsi alla circostanza favorevole, propria delle immagini satellitari, che la variabile grezza è nota in tutto il campo. E' importante notare che i variogrammi dei residui delle bande sono completamente diversi da

quelli dei residui della batimetria: i primi mostrano, tutti e quattro, un *range* di 10 m; gli altri un *range* di 50 metri. Questo vuol dire la variabilità, al netto del *trend*, dei *serial number* è da attribuirsi ad un fenomeno diverso da quello che controlla la batimetria. È questo il motivo per cui il contributo delle bande alla stima della batimetria può avvenire, in questo caso, solo attraverso il loro *trend*.

Il legame tra batimetria e banda rosso è meglio evidenziato dal loro *scatter plot* riportato nella Figura 7. In essa la batimetria è espressa come profondità. Dalla figura si evince un legame che rende il *trend* della batimetria  $m_b(x) = E[B(x)]$  modellizzabile con una funzione esponenziale:

$$m_b^*(x) = 7.5 * \exp(-0.030 * m_r(x)^{0.8}) \quad [3]$$

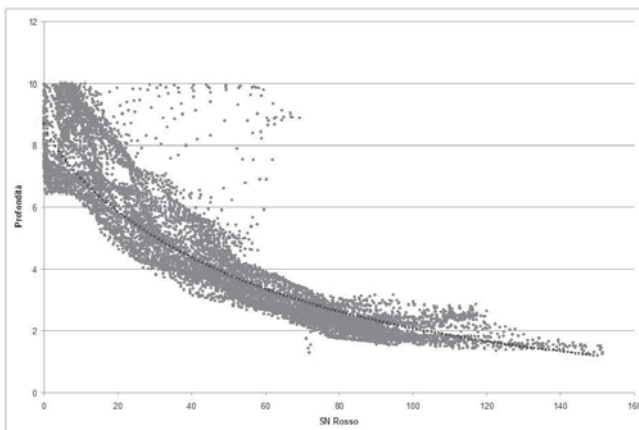


Figura 7: Scatter plot trend profondità-trend banda rosso

La mappa della suddetta funzione può essere considerata un'approssimazione dell'andamento medio della batimetria e può essere utilmente impiegata per la ricostruzione di quest'ultima, soprattutto quando le misure dirette di cui si dispone siano scarse.

Il metodo del *kriging con deriva esterna* (Chilès, Delfiner, 1999; Wackernagel, 2003) è la metodologia geostatistica adatta allo scopo, essendo capace di integrare in un'unica opera-

zione la mappa della funzione [3] con le misure dirette.

Al fine di verificare se, nelle condizioni illustrate, l'uso della mappa della funzione [3] quale deriva esterna, apporta un miglioramento nella stima, è stata effettuata la ricostruzione della batimetria partendo da due maglie di campionamento batimetrico una di 32 metri di lato e l'altra di 64. Entrambe le maglie sono state estratte dalle misure disponibili. I risultati delle stime sono stati confrontati con quelli ottenuti mediante il *kriging universale*, quindi a partire dalle sole misure batimetriche.

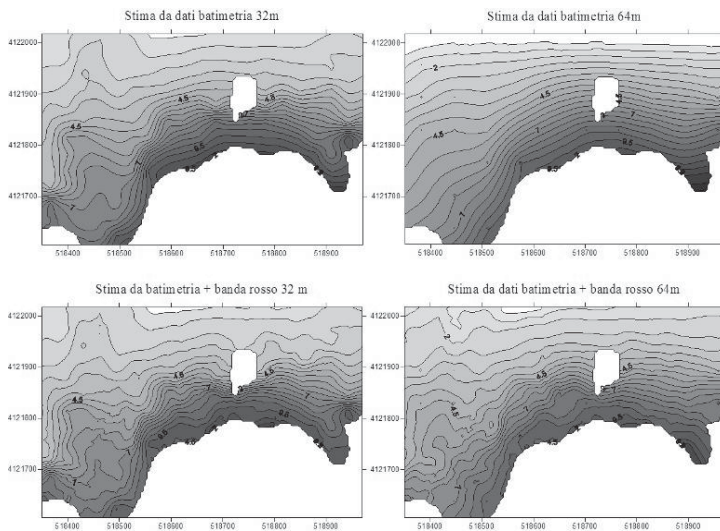


Figura 8: Confronto stime con campioni a 32 e 64 m

In Figura 8 e Figura 9 sono riportate le mappe ricostruite e gli *scatter plot* in cui sono messi a confronto le stime con le misure. Dal loro esame si evince che, nel caso della maglia di 32 metri, a cui corrispondono 150 celle di misura, i risultati delle stime effettuate con i due metodi sono paragonabili e quindi la funzione di *trend* non apporta alcun miglioramento. Ciò vuol dire che l'informazione diretta è sufficiente a tenere conto del *trend* che nel kriging universale è modellizzato

interamente dai dati. Nel caso di campionatura a 64 metri, a cui corrispondono solo 35 celle di misura, il contributo della funzione (1) come *trend* migliora la stima. Questo vuol dire che la maglia di campionatura non consente di cogliere l'andamento del *trend* e a ciò sopperisce la deriva esterna, nota in quasi tutte le celle. In particolare la stima effettuata con il kriging universale presenta, rispetto all'altra stima, una sottostima delle batimetrie basse ed errori più ampi nelle batimetrie alte.

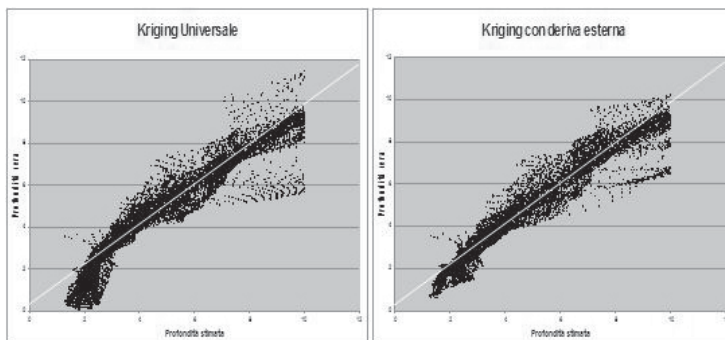


Figura 9: Scatter stime 64 m

### Conclusioni

Esistono molti strumenti per la determinazione e la mappatura della batimetria. Tuttavia, questi strumenti richiedono spesso tempi lunghi per la produzione di mappe accurate. In particolare, la grande quantità di dati

necessari possono essere proibitivi per i progetti in cui la determinazione batimetrica non è un tema centrale, ma invece un passo necessario a raggiungere qualche altro obiettivo. Questo studio preliminare ha dimostrato che in condizioni di bassa densità di campionamento l'introduzione dell'informazione telerilevata può accrescere l'accuratezza della stima della batimetria. L'utilizzo di questa tecnica integrata può quindi essere vantaggiosa in tutti quegli ambienti ad acqua bassa le cui caratteristiche batimetriche e morfologiche non rendano possibile l'utilizzo del *multibeam* e difficoltoso il campionamento tramite *single beam*. In particolare la metodologia dimostra che questo metodo è sorprendentemente accurato, data la piccola quantità di dati che vengono utilizzati per generare la batimetria.

### Bibliografia

- Wackernagel H. (2003), *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*, Springer.  
 Chilès J. P. (1999), *Geostatistics Modelling Spatial Uncertainty*, Wiley, New York.  
 Matheron G. (1971), *The theory of regionalized variables and its applications*, Paris School of Mines publication, Paris.