

## ESPERIENZE DI UTILIZZO DI TECNOLOGIE SAR NEL CALCOLO DEL DIGITAL ELEVATION MODEL E NEL MONITORAGGIO DI STRUTTURE EDILIZIE INTERESSATE DA DEFORMAZIONI DEL TERRITORIO

### *EXPERIENCES ABOUT INTERFEROMETRIC TECHNIQUE IN ORDER TO PRODUCE DIGITAL ELEVATION MODEL AND IN ORDER TO MONITOR BUILDINGS INVOLVED IN DEFORMATIONS OF THE TERRITORY*

C. Marzo (\*), A. Losurdo (\*\*), L. Guerriero (\*\*\*), A. Colangelo (\*\*)

(\*) Agenzia Spaziale Italiana.

(\*\*) Geocart srl.

(\*\*\*) Università degli Studi di Bari.

#### **Riassunto**

Con i satelliti europei ERS1 ed ERS2 si è reso disponibile un RADAR ad apertura sintetica SAR in grado di acquisire scene con una estensione a terra pari a circa cento chilometri di lato. Il SAR permette di effettuare misure di elevazione (*Digital Elevation Model*, abbreviato DEM) e misure di deformazione del suolo (Ferretti et al., 2001, pp. 8-20; Berardino et al., 2002, pp.2375-2383; Werner et al., 2003). Ad oggi queste tecniche sono oggetto di ricerca e sviluppo e sono particolarmente promettenti in ambito applicativo.

Il gruppo di lavoro formato dagli autori ha approfondito i temi della geometria orbitale di ripresa e della tecnica di acquisizione del dato radar, che hanno portato alla implementazione di alcuni algoritmi utilizzati nella catena di elaborazione interferometrica.

#### **Abstract**

*The Synthetic Aperture Radar (SAR) on space-borne ERS1 ERS2 acquires a large image with a 100 km side. Using SAR data it is possible to measure the elevations and the movements with millimetre accuracy (Ferretti et al., 2001, pp. 8-20; Berardino et al., 2002, pp.2375-2383; Werner et al., 2003).*

*Today these techniques are object of Research and Development and are particularly promising for the applications.*

*The staff of the authors studied the orbital geometry of the radar acquisition and the image formation, then they developed some algorithms for the interferometric processing chain.*

## 1. Il radar SAR e il principio della interferometria

Il radar SAR sulla piattaforma ERS è un sensore attivo e coerente funzionante nelle microonde in banda C alla lunghezza d'onda di 5.66660 cm.

Il fascio proiettato dal radar è obliquo con l'angolo compreso tra la verticale e la direzione di vista (*slant range*) di circa 23° (Figura 1).

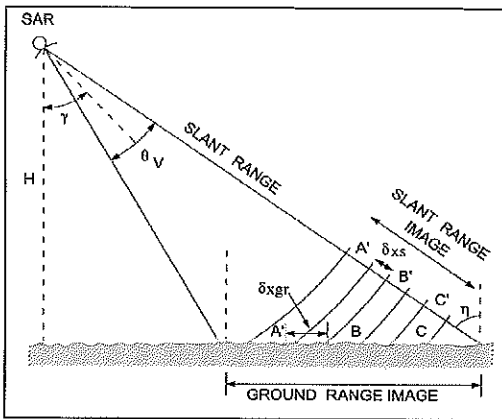


FIGURA 1 – Geometria di acquisizione del dato SAR.

I target a terra colpiti dal fascio contemporaneamente si dicono compresi nell'area di *swath* e la riflettività di questi punti viene proiettata lungo la direzione di *slant range* e vanno a comporre l'immagine.

I satelliti ERS1 ed ERS2 acquisiscono scene di 100km x 100km in un tempo pari a 16 secondi con un intervallo di 35 giorni. Tali acquisizioni con l'applicazione delle tecniche interferometriche consentono di effettuare misure di deformazione al di sotto del centimetro (Ferretti

et al., 2001, pp. 8-20; Berardino et al., pp. 2375-2383).

Le tecniche interferometriche utilizzano coppie di dati SAR che riprendono la stessa area. I due dati sono denominati *master* e *slave* (in figura 2, M ed S), essi acquisiscono l'area di interesse in tempi successivi e posizioni leggermente diverse. Il dato master è utilizzato come riferimento geometrico per identificare le coordinate pixel sull'immagine del punto a terra, il dato slave è ricampionato sul dato master in modo che si abbia la corrispondenza tra le omologhe celle di risoluzione illuminate da due posizioni differenti.

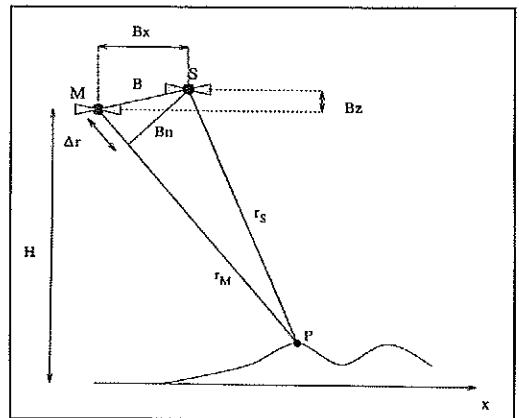


FIGURA 2 – Geometria di acquisizione del dato interferometrico.

La differenza di fase tra due pixel omologhi è così descritta (Madsen et al., 1993, pp.246-256):

$$\Delta\Phi = \Phi_M - \Phi_S = \frac{4\pi}{\lambda} (r_M - r_S) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad [1]$$

In generale si possono riconoscere in  $\Delta r$  due contributi:

$$\Delta r = \Delta r_B + \Delta r_T \quad [2]$$

con  $r_B$  che dipende dalla diversa posizione di acquisizione e dalla quota del punto,  $r_T$  dal possibile spostamento del bersaglio nella direzione di slant range durante l'intervallo di tempo che intercorre tra i due passaggi del satellite (Ferretti et al., 2000, pp. 67-79).

Dalle relazioni [1] e [2] si comprende la possibilità di elaborare i dati SAR in modo da calcolare la Mappa digitale di Elevazioni (DEM) e la Mappa di deformazione del terreno.

## 2. La catena di elaborazione interferometrica: gli algoritmi sviluppati

La catena di elaborazione classica per produrre il DEM utilizzando una coppia di dati SAR *master* e *slave* è così schematizzata:

L'interferogramma contiene per ogni pixel il valore principale della fase  $f_{prin}$  cioè la frazione di fase che occorre sommare ad un tot di rotazioni di fase per ottenere la fase assoluta  $f_{ass}$  che è proporzionale alla quota dell'area ripresa a terra e proiettata in geometria orbitale, questa operazione è denominata "srotolamento di fase".

$$\ddot{O}_{ass} = 2k\delta + \ddot{O}_{prin} \quad [3]$$

I limiti del processo interferometrico dipendono dalla bassa coerenza temporale del punto a terra che è soggetto a cambiare le proprie caratteristiche di riflettività. Per calcolare il DEM e ovviare ai problemi di decorrelazione si utilizzano coppie di dati ripresi ad un giorno di distanza (coppie *tandem*). Per produrre mappe di deformazione del terreno si utilizzano metodi di ricerca di target puntiformi stabili nel tempo e nello spazio (Werner et al., 2003).

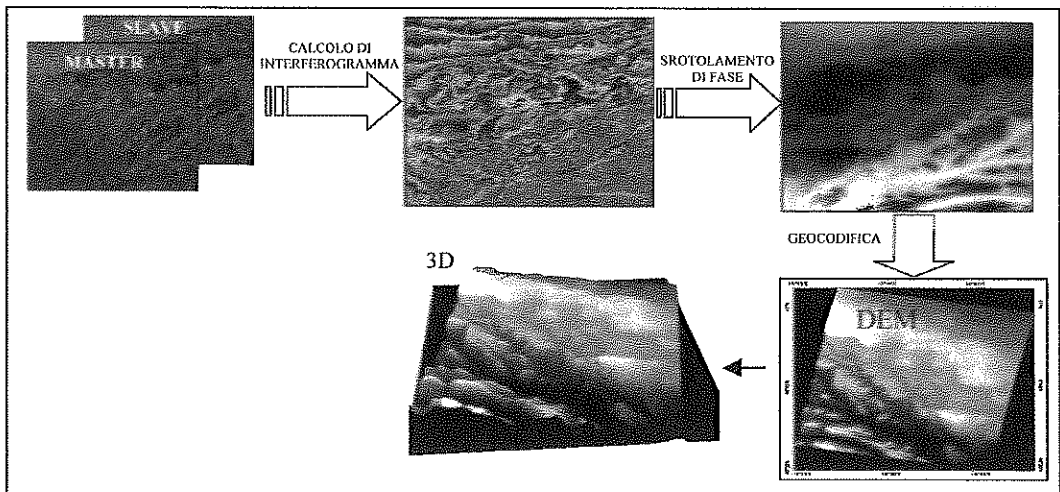


FIGURA 3 – Schema a blocchi della catena di elaborazione interferometrica che produce il DEM.

Al fine di produrre DEM di precisione e Mappe di deformazione del terreno sono stati sviluppati alcuni algoritmi riportati di seguito:

1. Modello orbitale;
2. Tiepoint automatico;
3. Modulo di sottrazione della orografia (DR);
4. Modulo di Geocodifica.

### 2.1. Modello Orbitale

Le informazioni sull'orbita descritta dal satellite in fase di acquisizione sono contenute nel file di annotazione allegato al dato SAR, tra esse figurano la posizione e la velocità del satellite lungo la traiettoria in 5 istanti, questi ultimi sono detti *state vectors*.

Si può assumere il modello dell'orbita descritta dal satellite (ERS1/ERS2) come un arco di parabola. Questa approssimazione è lecita in quanto l'accelerazione del satellite è praticamente costante.

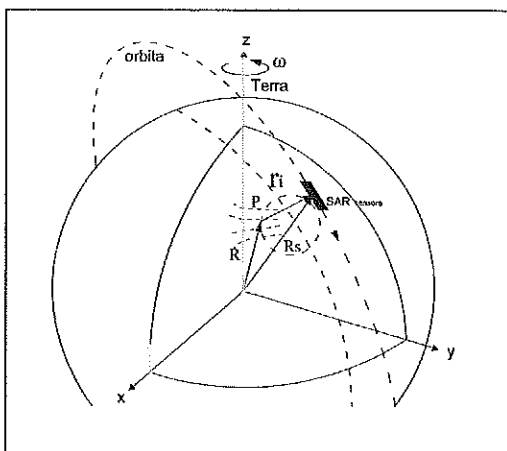


FIGURA 4 – Rappresentazione della traiettoria orbitale descritta dal satellite ERS1 e ERS2 su cui è montato il SAR.

Le informazioni di posizione e velocità istantanea sono in coordinate geocentriche. Per cui l'equazione del moto è scomponibile nelle componenti XYZ:

$$\begin{aligned} X_s &= a_x t^2 + b_x t + c_x \\ Y_s &= a_y t^2 + b_y t + c_y \\ Z_s &= a_z t^2 + b_z t + c_z \end{aligned} \quad [4]$$

### 2.2. Tiepoint automatico

In alcuni processi della catena interferometrica si rende necessario riconoscere ove si vanno a localizzare sull'immagine SAR alcuni punti (denominati *ground control points*) a terra della zona acquisita o inversamente è utile associare a punti dell'immagine elaborata SAR le coordinate geografiche della porzione di area che ne viene ritratta (Linder W., Meuser H.-F, 1993, pp. 207-212). Il Tiepoint automatico è l'algoritmo che permette le suddette associazioni.

Per calcolare la distanza del punto a terra dall'orbita si richiama il concetto della formazione del dato, il quale viene elaborato con una operazione di *deskew* che lo riporta in una posizione geometrica di distanza minima dalla traiettoria dell'orbita, inoltre la conoscenza delle modalità di acquisizione del dato riga-colonna permettono di localizzare il punto.

Le relazioni fondamentali dell'algoritmo sono di seguito riportate:

*Line* e *sample* sono le coordinate riga e colonna del dato SAR acquisito,

$$\text{line} = (t_{\min} * \text{PRF}) \quad [5]$$

ove PRF da *Pulse Repetition Frequency*

costituisce la frequenza di campionamento lungo la direzione di volo del satellite e  $t_{\min}$  è l'istante in cui il satellite si trova a distanza minima dal punto a terra;

$$\text{sample} = \text{SAMPLINGRATE} * 2(d_{\min} - R_0) / c \quad [6]$$

ove *Samplingrate* è la frequenza di campionamento lungo la direzione trasversa a quella di volo,  $d_{\min}$  è la distanza a cui si trova il satellite nell'istante  $t_{\min}$  ed  $R_0$  uguale a:

$$R_0 = \text{RANGEPixel}[0] / 2 * c \quad [7]$$

è la distanza sensore primo pixel in direzione di slant-range calcolata utilizzando la velocità della luce  $c$  e il termine  $\text{RANGEPixel}[0]$  che indica il tempo utile al satellite per acquisire l'area ritratta nel primo pixel sulla linea di slant-range.

### 2.3. Modulo di Geocodifica

La geocodifica è la operazione che permette di trasformare la fase srotolata in un DEM (figura 3).

È stata importante la seguente scelta della terna di assi cartesiani:

$$X = \frac{S_2 - S_1}{|S_2 - S_1|} \quad [8]$$

dove  $S_1$  ed  $S_2$  rappresentano rispettivamente distanza satellite master e punto a terra da determinare (nominato P), e distanza satellite slave e punto P,  $S'_2$  è la proiezione del punto  $S_2$  lungo la direzione dell'asse X.  $S_1$  si determina con l'ap-

plicazione del modello orbitale e del tiepoint inverso mentre  $S_2$  dall'applicazione del modello orbitale e della distanza minima tra  $S_1$  e  $S_2$ .

$$Z = \frac{v1}{|v1|} \quad [9]$$

con  $v1$  la velocità con cui è descritta l'orbita nell'istante di acquisizione del punto, ricavata utilizzando il modello orbitale.

Infine il terzo asse Y si ottiene come prodotto vettoriale degli assi X e Z definiti:

$$Y = X \otimes Z \quad [10]$$

Per l'ipotesi iniziale si assume che il punto P di cui si vogliono calcolare le coordinate geografiche si trovi nel piano XY.

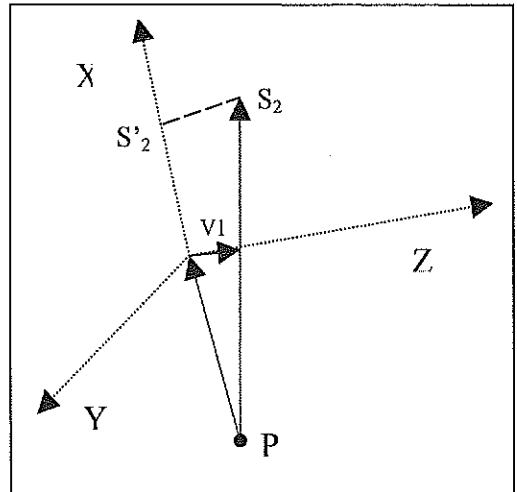


FIGURA 5 – Rappresentazione grafica della terna di assi cartesiani con P punto da determinare.

La distanza tra satellite master e punto P,  $R_1$ , è misurabile richiamando il modello orbitale e il tiepoint automatico, mentre  $R_2$ , distanza tra satellite slave e punto P, si ricava sommando ad  $R_1$  la fase assoluta convertita in distanza secondo il fattore di proporzionalità  $4p/l$ ,  $R'_2$  distanza tra satellite slave in proiezione  $S'_2$  e il punto P, per semplicità si è usata la convenzione che  $R'_2$  modulo sia molto vicino al valore modulo di  $R_2$ , ha senso fare questa semplificazione a ragione del fatto che  $R$  è dell'ordine di 850 Km.

Indico con  $C_1$  la circonferenza con centro in  $S_1$  e raggio  $R_1$  mentre con  $C_2$  la circonferenza con centro in  $S'_2$  e raggio  $R'_2$ .

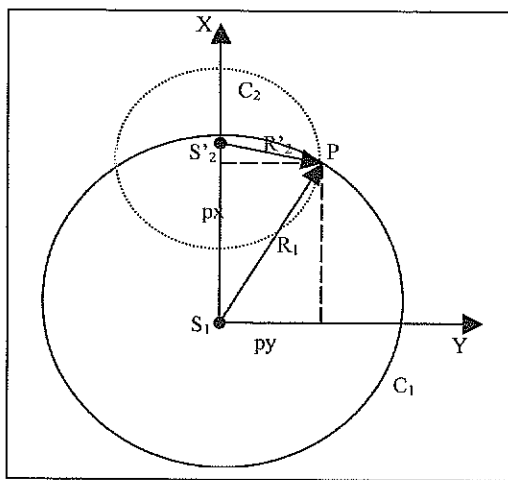


FIGURA 6 – Rappresentazione grafica del problema di geocodifica da risolvere per la determinazione di P.

Il punto P si ottiene come intersezione delle due circonferenze  $C_1$  e  $C_2$ , per cui occorre risolvere il seguente sistema di equazioni:

$$\begin{aligned} X^2 + Y^2 &= R_1^2 \\ (X - S'_2 S_1)^2 + Y^2 &= R'_2^2 \end{aligned} \quad [11]$$

X ed Y costituiscono le componenti lungo i due assi della posizione del punto P.

Dalla [11] si ricavano le soluzioni X e Y. X è univocamente determinata ed Y assume due valori di cui viene scelto quello fisicamente valido. Per riportare il punto P nel sistema di riferimento Geocentrico si applica lo spostamento del sistema utilizzato di un vettore pari a  $OS_1$ .

#### 2.4. Modulo di sottrazione orografica

Il modulo di sottrazione orografica richiama il modulo di modello orbitale e l'acquisizione del punto a terra alla minima distanza dal satellite.

L'algoritmo consente di stimare le posizioni e quindi le distanze dei satelliti master,  $R_1$ , e slave,  $R_2$ , durante l'acquisizione del punto P generico individuato a terra da un DEM di origine qualsiasi, e di qui il calcolo della differenza  $Dr$  (Figura 7).

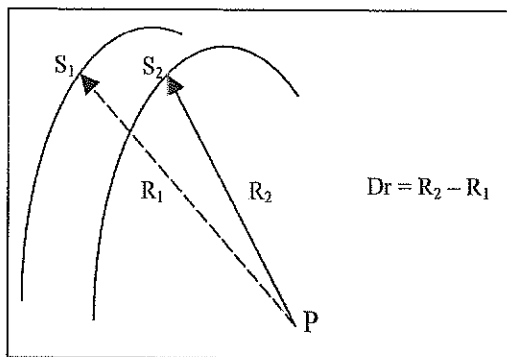


FIGURA 7 – Schematizzazione delle due orbite Master e Slave e del punto a Terra P.

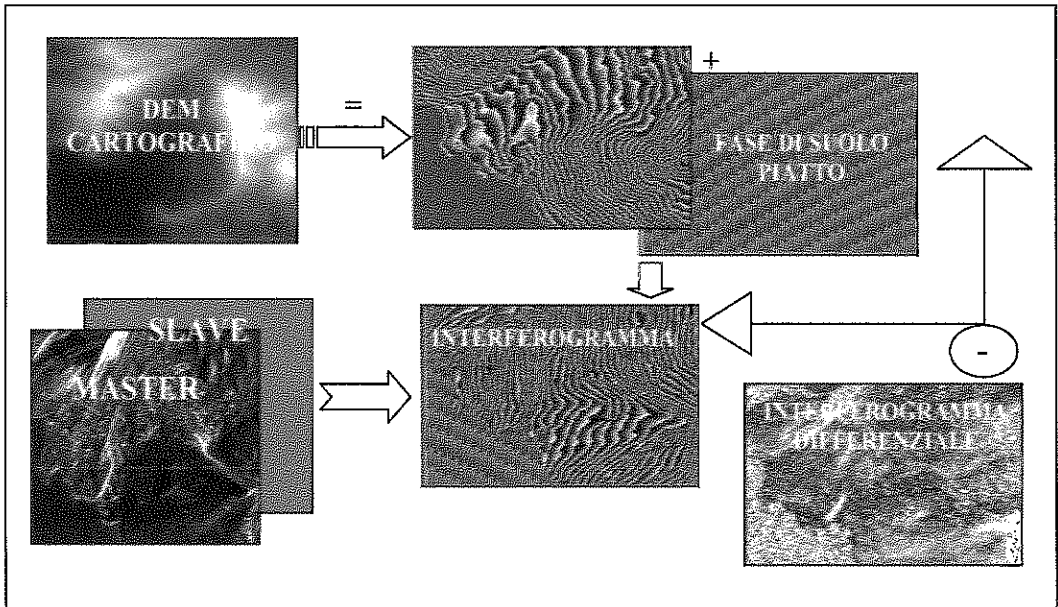


FIGURA 8 – Schema a blocchi della procedura per la produzione di interferogrammi differenziali.

Questo processo è fondamentale nella elaborazione dei dati SAR finalizzata alla creazione di mappe di deformazione del terreno, perché permette di produrre gli interferogrammi differenziali che, come è schematizzato in figura 8, costituiscono l'informazione  $\Delta\phi$  [1] a cui è stato sottratto il contributo legato alla orografia (fase di orografia) e il contributo legato alla geometria orbitale (fase di suolo piatto). La fase di orografia si ottiene applicando il modulo di sottrazione orografica ad un DEM qualsiasi.

L'applicazione dello stesso modulo nella catena di elaborazione per la produzione del DEM (Figura 3) semplifica l'operazione di srotolamento di fase.

### 3. Conclusioni

I moduli descritti sono stati utilizzati per ottenere DEM e mappe di deformazione del terreno.

#### 3.1. Applicazione dei Moduli: Dem Precisi

Al fine di validare gli algoritmi descritti si è applicato il modulo di sottrazione della orografia e il modulo della geocodifica a due coppie tandem relative alla zona di Matera. La qualità del risultato è stata valutata calcolando la immagine differenza di quota sulla area comune.

In figura 10a viene visualizzata la distribuzione dello scostamento tra i DEM ottenuti dalle due coppie di dati tandem

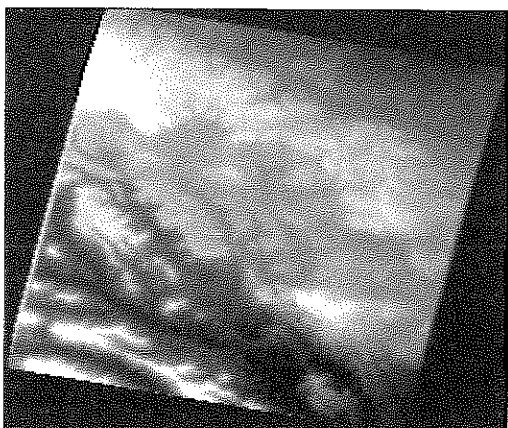


FIGURA 9 – DEM interferometrico dell'area di Matera ottenuto dalla coppia 17-18 Ottobre 1999 ERS1-ERS2.

utilizzate. Risulta evidente una correlazione dell'errore tra pixel adiacenti da imputare a varie cause tra cui un effetto atmosferico. Nel grafico a destra si visualizza la distribuzione dell'errore che ha una standard deviation di circa 12 m.

### 3.2. Applicazione dei Moduli: Produzione di mappe di deformazioni

Il Modulo di sottrazione orografica è stato utilizzato per ottenere gli interferogrammi differenziali nella attività di monitoraggio degli spostamenti di alcuni fabbricati siti a Maratea (PZ).

Nella figura 11 si riportano i grafici di alcune differenze di fase differenziale misurate tra punti vicini caratterizzati da una stabile riflettività al fascio radar.

I punti in moto (Figura 11a) hanno un andamento di fase arrotolata nel tempo, lo spostamento subito nell'intervallo temporale Gennaio '92-Gennaio '06 è proporzionale al numero di rotazioni e alla lunghezza d'onda del radar (5.66660 cm).

I punti fermi (Figura 11b) sono caratterizzati da una distribuzione di valori di fase sullo zero fatta eccezione per i dati relativi agli anni 2003-2004-2005, ove il dato originale è risultato non cor-

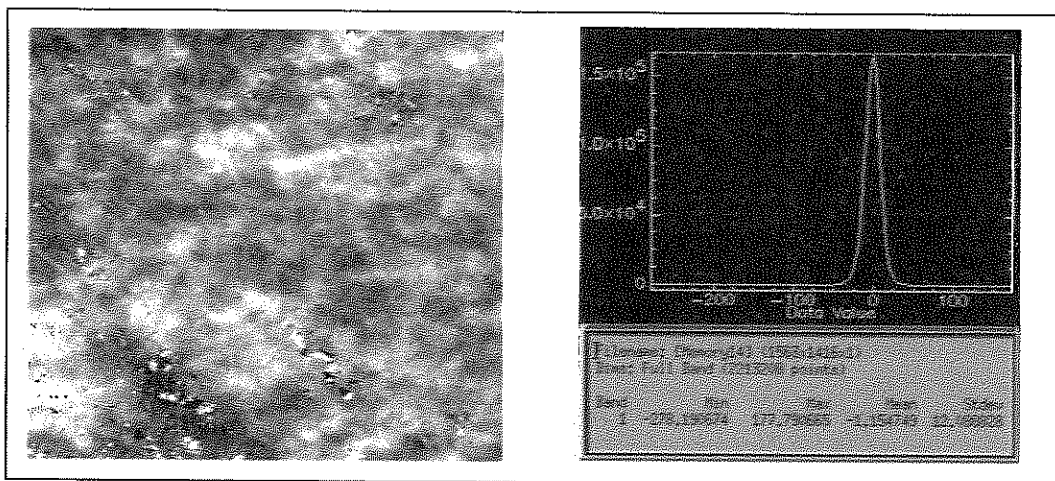


Figura 10 abc – a) A sinistra l'immagine differenza di quote; b) In alto a destra, l'istogramma dei valori di differenza di quota; c) in basso a destra, la statistica dell'istogramma.

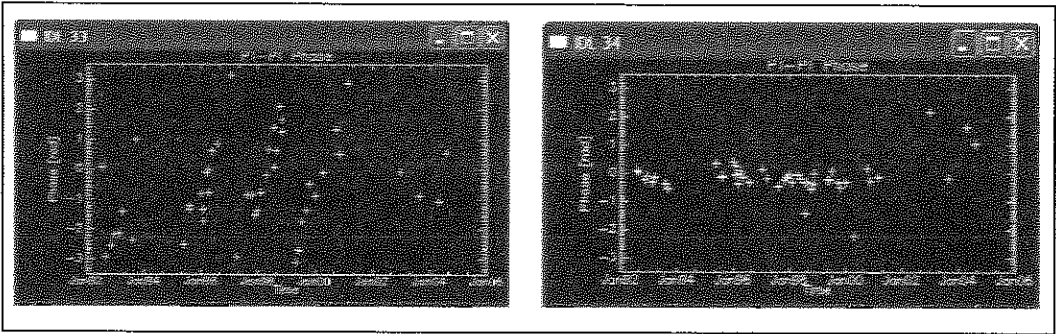


Figura 11 ab – a) A sinistra: grafico XY della differenza di fase differenziale in funzione del tempo per una coppia di punti che si sposta di 1.1cm l'anno; b) A destra: grafico XY della differenza di fase differenziale in funzione del tempo per una coppia di punti che sono fermi.

rettamente calibrato e perciò non utilizzabile.

I risultati ottenuti dalla elaborazione SAR interferometrica sono in accordo con rilievi effettuati in loco.

## Bibliografia

- OPPENHEIM A.V., SCHAFER R.W., *Elaborazione numerica dei segnali*, Editore Franco Angeli, 2003.
- OPPENHEIM A.V., WILLSKY ALAN S., *Signal and System*, Prentice hall signal processing series, 1996.
- SCHREIER G., *Geometrical Properties of SAR Images*, ed. G. Schreier - Wichmann, 1993.
- CURLANDER JOHN C., McDONOUGH ROBERT N., *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*, John Wiley & Sons, 1991.
- WERNER C., WEGMULLER U., STROZZI T., WIESSMANN A., *Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping*, IGARSS'03, Toulouse, France, 21-25 July 2003.
- BERARDINO P., FORNARO G., LANARI R., SAN-SOSTI E., *A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2002, vol. 40 pp. 2375-2383.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F., *Permanent Scatterers in SAR Interferometry*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2001, vol. 39 pp. 8-20.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F., *Measuring Subsidence with SAR Interferometry: Applications of the Permanent Scatterers Technique*, Proceedings of the Sixth International Symposium on Land Subsidence, Vol. II, SISOLS 2000, 24-29 Settembre, Ravenna, Italia, pp. 67-79.
- LINDER W., MEUSER H.-F., *Automating Tie-pointing in SAR Images*, Cap. IX «Geometrical Properties of SAR Images», ed. G. Schreier - Wichmann, 1993, pp. 207-212.
- MADSEN S.N., ZEBKER H.A., and MARTIN J., *Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques*, IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing, Vol. 31, no. 1, 1993, pp. 246-256.