

# 1 INTERFEROMETRIA DIFFERENZIALE SAR E TECNICA PS

I sistemi radar satellitari forniscono immagini elettromagnetiche (a frequenze comprese tra 500MHz e 10GHz) della superficie terrestre con risoluzione spaziale di qualche metro. Rispetto ai più noti sistemi ottici operano con continuità, potendo acquisire dati in presenza di copertura nuvolosa e sia di giorno che di notte.

Il principio di funzionamento è il medesimo di tutti i sistemi radar (acronimo di *radio detecting and ranging*): un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incide su eventuali oggetti subendo un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, *scattering*). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, equipaggiata anche per la ricezione, dove vengono misurate le sue caratteristiche. Il dispositivo è in grado di individuare il bersaglio elettromagnetico (*detecting*) e, misurando il ritardo temporale tra l'istante di trasmissione e quello di ricezione, valutare la distanza (*ranging*) a cui è posizionato, localizzandolo in modo preciso lungo la direzione di puntamento dell'antenna (direzione di *range*).

La direttività dell'antenna utilizzata per trasmettere e ricevere il segnale radar, e cioè la selettività nell'illuminazione dello spazio circostante, consente di localizzare l'oggetto anche lungo l'altra dimensione (detta di *azimut*). Quanto più grande è l'antenna, tanto più stretta è la sua impronta e, di conseguenza, tanto meglio viene localizzato il bersaglio. Chiaramente ciò avviene a scapito dell'estensione dell'area illuminata. Per ovviare questo inconveniente, le antenne molto direttive usate per i radar militari e per applicazioni di aviazione civile ruotano, in modo da "spazzare" tutta l'area circostante alla loro posizione.

L'idea alla base del SAR (*Synthetic Aperture Radar* - Radar ad Apertura Sintetica) consente di aggirare la stessa limitazione, raggiungendo un compromesso tra risoluzione ed estensione dell'area osservata. Combinando coerentemente (cioè tenendo conto di ampiezza e fase del segnale SAR) i dati acquisiti dal sensore nelle posizioni successivamente occupate, si sintetizza un'antenna fittizia di grandi dimensioni detta, appunto, apertura sintetica. È proprio questo procedimento a garantire un'elevata risoluzione anche nella direzione di *azimut*.

Poiché il sistema illumina lo spazio è un sistema attivo, non è quindi richiesta l'illuminazione solare, inoltre le frequenze utilizzate penetrano senza sensibili attenuazioni attraverso le nuvole, evitando così i già accennati problemi di acquisizione dei sistemi ottici.

Le informazioni geografiche di carattere generale contenute in un'immagine ottica ed in una radar sono le stesse, tuttavia in quest'ultima si può notare come le strutture al suolo rispondano in modo differente alle onde elettromagnetiche emesse: le strade appaiono nere

poiché riflettono specularmente il campo trasmesso, mentre le strutture metalliche sono particolarmente luminose.

Nel presente progetto sono stati utilizzati i dati rilevati dai satelliti ESA (*European Space Agency*) ERS-1 ed ERS-2 (Figura 1): ERS-1 ha acquisito dati dal Luglio 1991 al Marzo 2000, ERS-2 è invece operativo dall'estate del 1995.



Figura 1: immagine del satellite ERS-2.

I satelliti ERS seguono orbite eliosincrone lievemente inclinate rispetto ai meridiani, illuminando, da una quota attorno a 780 km, una striscia di terreno (*swath*) larga circa 100 km con un sistema radar SAR operante nel dominio delle microonde alla frequenza di 5.3 GHz, ovvero con una lunghezza d'onda  $\lambda$  pari a 5.66 cm, caratteristica fondamentale per poter apprezzare movimenti millimetrici.

La stessa orbita nominale viene ripercorsa ogni 35 giorni (*revisiting time*), consentendo così di acquisire dati relativi alla stessa scena al suolo in tempi differenti.

Grazie alla scelta di ESA di acquisire continuamente i dati a partire dal 1992, per vaste aree del pianeta, sono oggi disponibili i *dataset* dell'ultimo decennio composti da un'immagine radar ogni 35 giorni, che costituiscono un'informazione storica di enorme rilevanza potendo studiare l'evoluzione della fase per ciascuna acquisizione e ricostruire la storia delle deformazioni.

La direzione parallela all'orbita è detta *azimut* e coincide approssimativamente con la direzione Nord-Sud. La risoluzione (ovvero la capacità di riconoscere come distinti due bersagli) in *azimut* vale circa 5 m.

La direzione della congiungente sensore-bersaglio (perpendicolare all'orbita ed inclinata di un angolo  $\theta$  - detto *off-nadir* - rispetto alla verticale e pari mediamente a  $23^\circ$ ) è detta *slant range*

(o più semplicemente *range*) oppure *Line Of Sight* (LOS). La risoluzione in *range* vale circa 8 m. Le immagini radar si sviluppano pertanto lungo le direzioni di *range* e *azimut*, dette usualmente coordinate SAR. In Figura 2 è rappresentata schematicamente la geometria di acquisizione dei sistemi SAR-ERS.

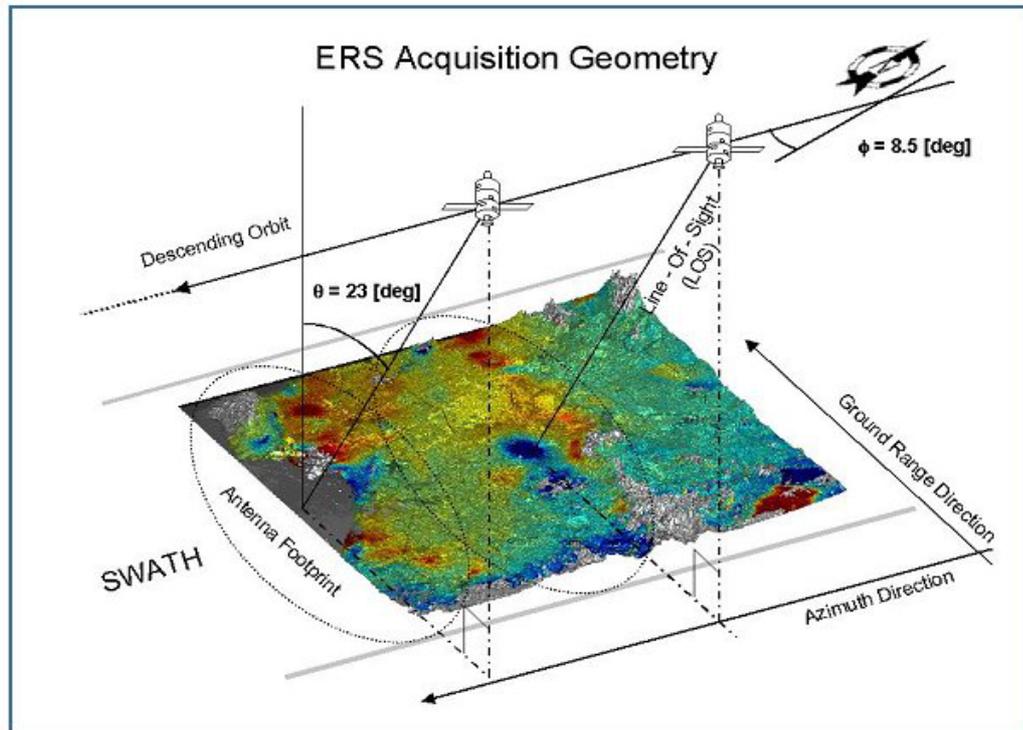


Figura 2: geometria d'acquisizione SAR delle piattaforme ERS-1 ed ERS-2.

Durante i vari passaggi lungo la stessa orbita i satelliti si discostano leggermente dalla traiettoria nominale, di fatto vi sono delle variazioni dell'ordine delle centinaia di metri descritte dal parametro *baseline* geometrico (o normale); di conseguenza la geometria di acquisizione per la stessa zona varia di volta in volta per angoli leggermente diversi creando matrici di *pixel* non corrispondenti alla medesima cella di risoluzione al suolo.

Per effettuare l'analisi è necessario che a *pixel* omologhi nelle varie immagini corrisponda la stessa cella di risoluzione, si procede quindi con una fase di elaborazione dei dati detta registrazione (o ricampionamento). Operativamente, tra tutte le acquisizioni, si sceglie un'immagine, detta *master*, come riferimento; tutte le rimanenti, dette *slave*, vengono ricampionate sulla geometria della *master*, grazie ad un opportuno modello, in modo da avere la stessa griglia di riferimento per tutti i passaggi del satellite. Il modello utilizzato permette di compensare sia una rotazione sia una traslazione indotta sulle immagini a causa del differente angolo di vista.

La modalità di acquisizione, non perpendicolare al suolo ma secondo un angolo di vista  $\theta$ , descritta nel paragrafo precedente, dà origine nelle immagini focalizzate a delle deformazioni prospettiche a causa della topografia del terreno. Ne occorrono di tre differenti tipi, in base alla pendenza del terreno:

1. *foreshortening*: si verifica quando la pendenza del terreno tende ad essere perpendicolare alla congiungente sensore-bersaglio (pendenza positiva pari all'angolo di *off-nadir*  $\theta$ ); in questi casi il contributo di più punti si concentra in poche celle producendo pixel molto luminosi nell'immagine di ampiezza.
2. *layover*: si verifica quando la pendenza del terreno è maggiore dell'angolo  $\theta$ ; questo produce una forte distorsione dell'immagine che impedisce la corretta interpretazione del segnale e ogni analisi quantitativa.
3. *shadowing*: si verifica quando alcune zone non possono essere illuminate dall'impulso *radar* perché schermate da altri oggetti; si producono quindi nell'immagine di ampiezza aree molto scure (in ombra).

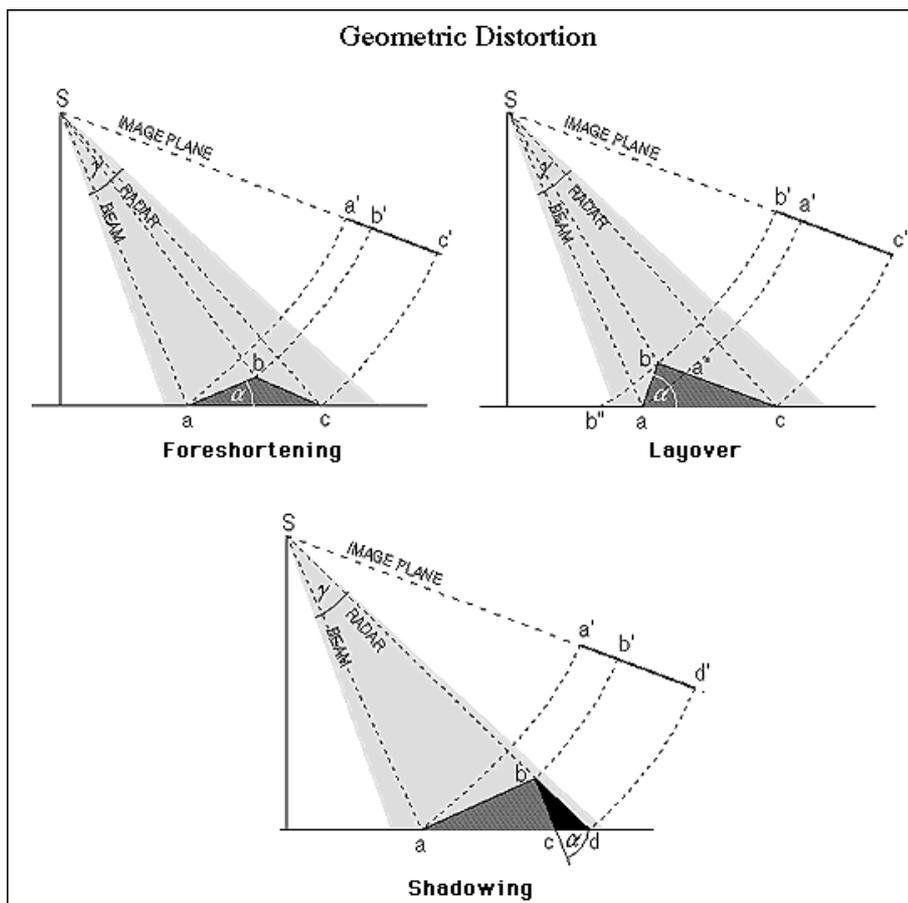


Figura 3: geometrie dei diversi fenomeni.

## 1.1 Interferometria Differenziale SAR (DInSAR)

La tecnica convenzionale per lo studio di dati SAR è l'interferometria differenziale, che si basa sull'analisi delle variazioni del valore di fase tra due distinte acquisizioni in modo tale da mettere in luce eventuali differenze riconducibili a fenomeni di deformazione, topografia o disturbi atmosferici (Massonnet e Feigl, 1998, Rosen et al., 2000).

L'interferogramma è la matrice di dati ottenuta dal confronto tra le due distinte acquisizioni della stessa area e racchiude in sé le informazioni relative ai vari contributi che generano il valore di fase.

Come accennato, il segnale radar relativo ad un bersaglio è caratterizzato da due valori: l'ampiezza e la fase. L'ampiezza individua la parte di campo elettromagnetico incidente riflessa verso il sensore. Nelle immagini radar di ampiezza appaiono particolarmente luminose le strutture metalliche (tralicci, antenne, linee ferroviarie), mentre bacini d'acqua e strade sono solitamente poco luminosi: essi sono caratterizzati infatti da fenomeni di riflessione speculare in cui la quota di campo riflessa verso il satellite risulta molto contenuta. La fase racchiude invece l'informazione più importante ai fini delle applicazioni interferometriche: la distanza sensore-bersaglio. I termini che contribuiscono alla fase di una singola immagine SAR sono molteplici e possono essere riassunti nella seguente equazione:

$$\phi = \psi + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r + \alpha + n$$

dove  $\psi$  è il termine di fase dovuto alla riflettività del bersaglio (dipendente dal materiale e dalla sua geometria),  $\alpha$  è un contributo di fase dovuto all'atmosfera,  $r$  è la distanza sensore-bersaglio (questo valore, moltiplicato per il fattore riportato nell'equazione, viene indicato con il termine di propagatore) e  $n$  è un inevitabile rumore proprio del sistema di acquisizione.

L'obiettivo della tecnica interferometrica è quello di isolare gli effettivi contributi di fase dovuti al movimento del bersaglio e non imputabili a disturbi, ovvero di stimare accuratamente la differenza di cammino ottico  $\Delta r$  dell'onda elettromagnetica trasmessa in due successive acquisizioni e retrodiffusa dal bersaglio a terra.

La fase di una singola immagine SAR non è di fatto utilizzabile, perché risulta impossibile discriminare un contributo dall'altro. Se si hanno, però, due acquisizioni relative alla stessa area, accuratamente registrate sulla stessa griglia di riferimento, è possibile utilizzare l'informazione contenuta in esse. In questo caso, infatti, si genera un interferogramma sottraendo la fase di un'immagine a quella dell'altra. Se non avvengono particolari cambiamenti nel periodo tra le due acquisizioni, i contributi dovuti alla riflettività si elidono e

la fase dell'interferogramma dipende, con buona approssimazione, solo dalla distanza sensore-bersaglio e, quindi, da eventuali movimenti intercorsi tra le due acquisizioni (a parte i contributi spuri dovuti all'atmosfera e al rumore).

Diversi effetti riducono (o addirittura compromettono) la qualità dei risultati ottenuti con l'analisi DInSAR. In primo luogo i fenomeni di decorrelazione temporale. Questi sono causati dalla variabilità delle proprietà elettromagnetiche (riflettività) dei bersagli radar tra i diversi giorni di acquisizione del dato, indicati dal parametro *baseline* temporale: in questo caso l'ipotesi che il contributo  $\psi$  si elida generando l'interferogramma non è più verificata. Le zone coperte da vegetazione, facilmente influenzabili dal vento e di diverso aspetto a seconda della stagione, sono spesso fonte di decorrelazione, mentre i centri urbani e le rocce esposte rimangono maggiormente stabili nel tempo (cambiamenti possono essere causati anche da altri eventi atmosferici quali pioggia o neve).

La qualità dell'interferogramma dipende anche dalla distanza tra le due orbite effettivamente percorse dal sensore durante l'acquisizione delle due immagini (detta *baseline* normale o geometrica). Si può dimostrare che maggiore è il valore assoluto della *baseline*, minore è la banda comune tra i due segnali e quindi minore è il rapporto segnale-rumore relativo all'interferogramma da esse generato. Questo disturbo è denominato decorrelazione geometrica. In Figura 4 è mostrato un esempio.

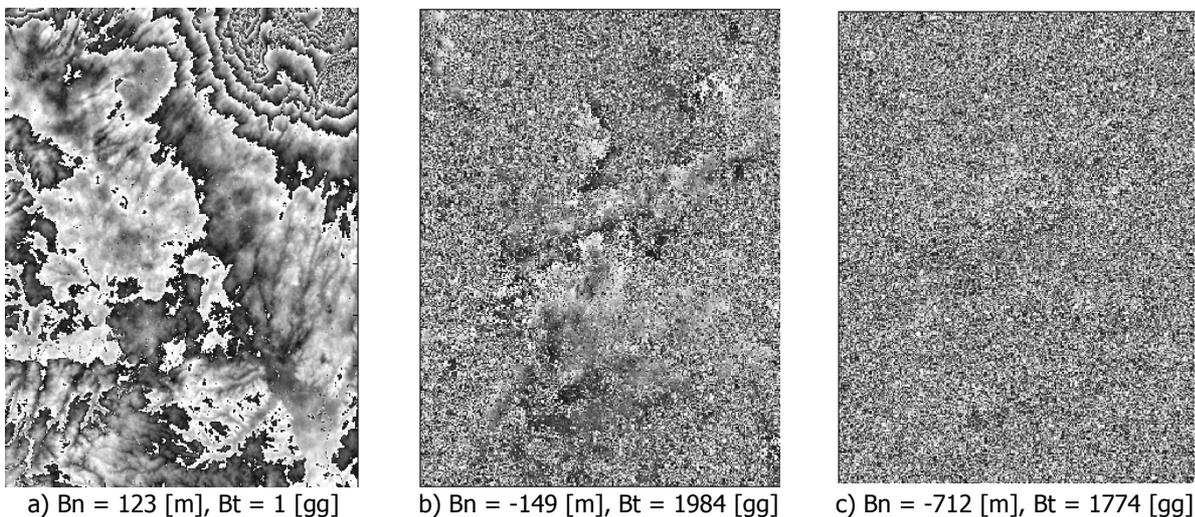


Figura 4: interferogrammi e disturbi dovuti a decorrelazione temporale e geometrica.

L'interferogramma a) è stato ottenuto utilizzando due acquisizioni a distanza di 1 giorno e con differenza nell'orbita nominale, pari a 123 m. Visto il limitato intervallo di tempo le

condizioni della scena non mutano sensibilmente, infatti l'interferogramma presenta una buona coerenza, ovvero sono pressoché assenti nell'immagine fenomeni di rumore. Le frange ben visibili corrispondono a variazioni di fase, e quindi alla variazione della distanza sensore-bersaglio, pari ad un ciclo. Di fatto esse sono costituite solamente dalla componente topografica della zona campione. Si può osservare nell'interferogramma b) come, aumentando l'intervallo temporale, pari ora a 1984 giorni, ma mantenendo quasi inalterata la componente di *baseline* normale (149 m), subentrino sensibili disturbi dovuti a decorrelazione temporale e viene a mancare la coerenza presente nel caso a). Nell'interferogramma c) i valori di *baseline* temporale e normale sono entrambi elevati: l'immagine appare completamente rumorosa e si perde completamente coerenza.

L'interpretazione dei dati interferometrici può essere ulteriormente complicata dalla variazione delle condizioni atmosferiche durante le due acquisizioni che si possono tradurre in un ulteriore termine di fase ( $\alpha$ ), difficile da discriminare dal contributo relativo a eventuali fenomeni di movimento (Figura 5). Un'attenta analisi bibliografica porta comunque alla conclusione che, con l'interferometria SAR tradizionale, si possono stimare movimenti con un'accuratezza dell'ordine del centimetro; inoltre, in genere non è possibile effettuare stime puntuali, ma solo analisi d'insieme per identificare fenomeni macroscopici in atto (estensione  $> 0.2 \text{ km}^2$ ).

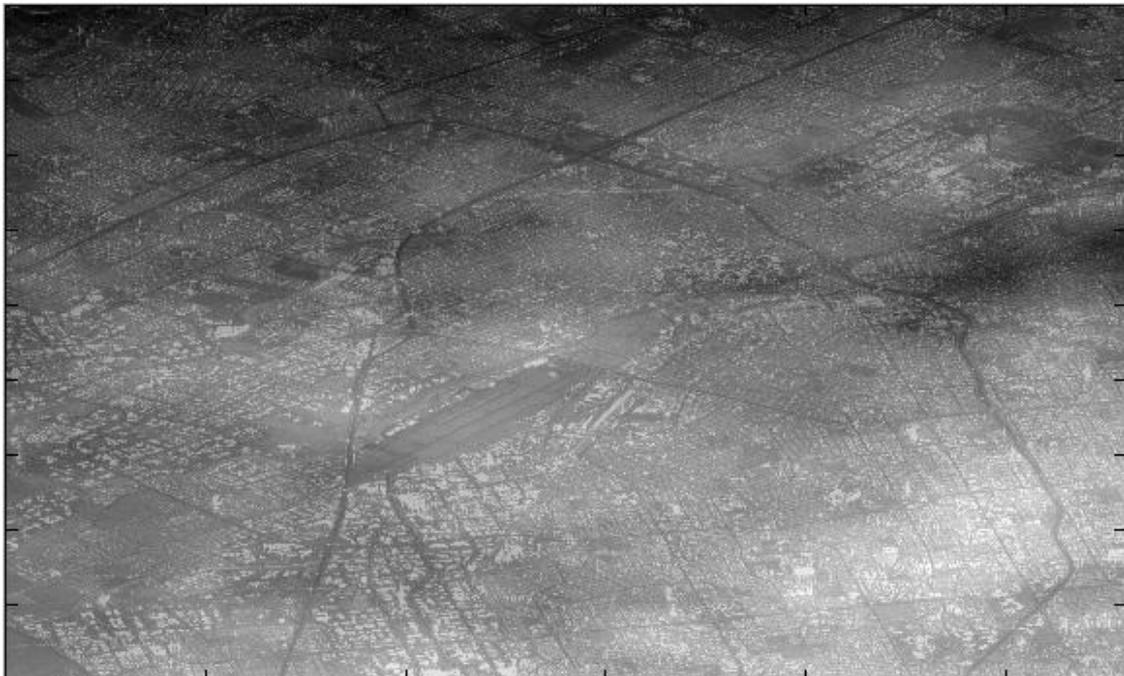


Figura 5: componente atmosferica di fase sovrapposta all'immagine di ampiezza.

## 1.2 Tecnica dei Permanent Scatterers (PS)

La Tecnica dei Diffusori Permanenti (*Permanent Scatterers*, PS) è stata sviluppata e brevettata presso il Politecnico di Milano e concessa in licenza esclusiva a TeleRilevamento Europa (TRE) S.r.l. nel 2000 (Colesanti et al., 2003; Ferretti et al., 1999, 2001). Si tratta di uno strumento estremamente efficace per il monitoraggio con accuratezza millimetrica di fenomeni di deformazione della superficie terrestre, basato sull'impiego di serie temporali d'immagini radar satellitari (in particolare, dati dei satelliti ERS-1/2 dell'ESA). L'approccio PS è basato sull'osservazione che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, costituito appunto dai diffusori permanenti (*Permanent Scatterers*, PS o Punti di Misura Permanente, PMP), è praticamente immune agli effetti di decorrelazione. Essi mantengono la stessa "firma elettromagnetica" in tutte le immagini al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche, preservano quindi l'informazione di fase nel tempo. I diffusori permanenti (PS) sono tipicamente parti di edifici, strutture metalliche, rocce esposte, comunque elementi già presenti al suolo, per i quali le caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente di acquisizione in acquisizione, mentre ciò non accade ad esempio per la vegetazione che muta di continuo.

La Figura 6 mostra una schematica rappresentazione della base teorica della tecnica interferometrica, di un *Permanent Scatterers* e dei disturbi presenti nelle acquisizioni SAR (variazione della componente di riflettività che dà luogo a decorrelazione temporale, variazioni della *baseline* normale che danno luogo a decorrelazione geometrica, disturbi atmosferici).

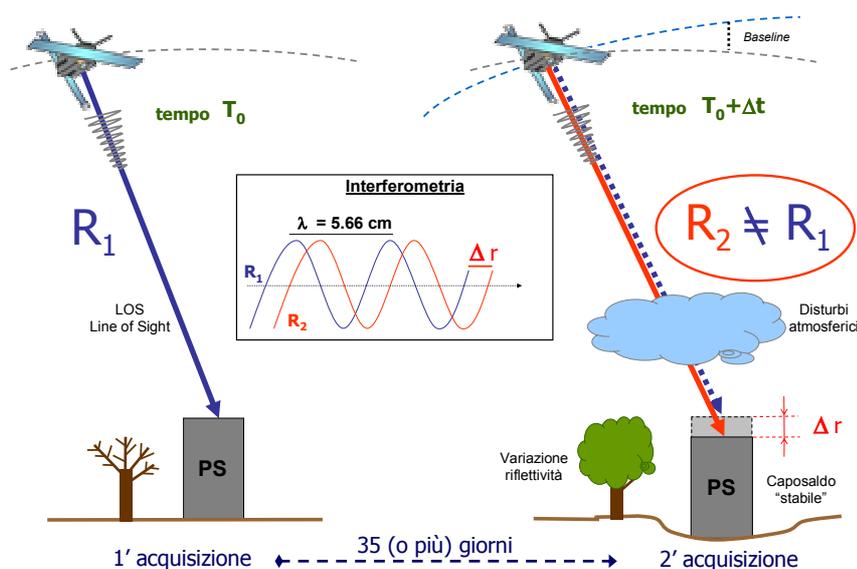


Figura 6: rappresentazione schematica della base teorica della tecnica PS.

L'elaborazione prende origine da uno studio statistico delle immagini, che porta alla selezione dell'insieme dei PS o diffusori permanenti, sostanzialmente immuni dai fenomeni di decorrelazione. Questa proprietà dei PS consente di superare gran parte delle limitazioni legate all'analisi DInSAR convenzionale.

Per i PS infatti, utilizzando le serie storiche delle acquisizioni, è possibile stimare sia l'entità del disturbo dovuto all'atmosfera terrestre, sia le possibili deformazioni superficiali della zona in esame. Ciò è reso possibile da un insieme di algoritmi di elaborazione numerica dei segnali frutto di oltre dieci anni di studi sviluppati dal gruppo SAR del Politecnico di Milano. Dopo aver rimosso il disturbo atmosferico dai dati si è in grado di stimare accuratamente i movimenti dei PS utilizzando il SAR come un vero e proprio strumento di misura delle deformazioni del terreno.

Si può immaginare la griglia di PS come una rete di stazioni GPS (*Global Positioning System*) naturali per il monitoraggio di vaste aree di interesse con una frequenza di aggiornamento del dato mensile e con una densità spaziale di punti di misura estremamente elevata (in aree urbane 100-300 PS/km<sup>2</sup>).

Il cuore del brevetto della Tecnica PS risiede nella capacità di stimare correttamente e compensare il disturbo atmosferico, che limita le applicazioni interferometriche, svolgendo un'analisi dettagliata solo sul sottoinsieme di PS accuratamente selezionati secondo valutazioni statistiche. Stimato il contributo atmosferico è possibile individuare tutte le componenti che costituiscono la fase interferometrica, eliminare i termini spuri e isolare il termine che descrive la variazione di cammino ottico dell'onda elettromagnetica nelle varie acquisizioni, cioè descrivere i movimenti che ha subito il bersaglio nell'arco temporale tra il primo e l'ultimo dato disponibile.

Per eseguire stime accurate dei disturbi atmosferici è necessario che la densità spaziale di PS sia sufficientemente elevata (maggiore di 5-10 PS/km<sup>2</sup>), vincolo sempre verificato in aree urbane avvalendosi di *dataset* consistenti in almeno 25-30 immagini ERS. In aree ad elevata urbanizzazione, la densità spaziale di PS raggiunge valori molto alti: 100 – 400 PS/km<sup>2</sup>.

I PS vengono correttamente posizionati nella cella di risoluzione al suolo e in corrispondenza di ciascuno si effettua una misura di deformazione per ogni acquisizione disponibile, con accuratezza sino a 1-2 mm su ogni singola misura (per i punti migliori). Si è quindi in grado di ricostruire il *trend* medio di deformazione annua, con accuratezza compresa tra 0.1 e 1 mm/anno. L'accuratezza è funzione del numero di immagini e della "qualità" del PS stesso, cioè di quanto l'informazione di fase disponibile presso il PS è immune ai fenomeni di disturbo. Tutte le misure sono rilevate lungo la congiungente sensore-bersaglio (LOS, *Line-*

*Of-Sight*), e sono di tipo differenziale, ottenute dopo avere determinato uno o più punti di riferimento a terra di coordinate note e supposti fermi o espressamente indicati ad esempio da misure GPS o di livellazione ottica.

Per la visualizzazione delle stime ottenute, è possibile rappresentare il *trend* medio di deformazione su un qualsiasi *background* che aiuti un'interpretazione e una geo-localizzazione dei fenomeni in atto (l'optimum è – ovviamente – operare in ambiente GIS dove l'utente può selezionare il *layer* opportuno). A titolo di esempio, in Figura 7, è visualizzata la mappa di deformazione di Pomona (California). I valori del campo di velocità sono saturati a  $\pm 30$  mm/anno.

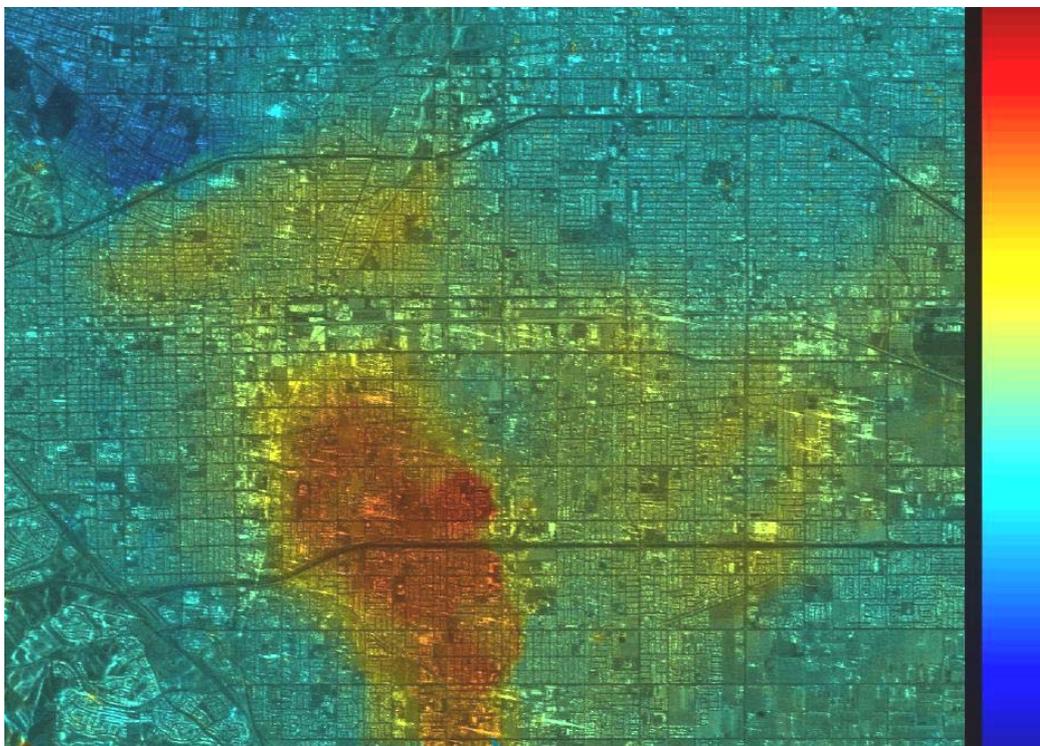


Figura 7: campo di velocità di Pomona (California) saturato a  $\pm 30$  mm/anno, in coordinate SAR.

### 1.2.1 VANTAGGI

In generale, la Tecnica PS presenta i numerosi vantaggi rispetto all'analisi DInSAR convenzionale, schematicamente riassumibili nei seguenti aspetti:

- possibilità di stime puntuali;
- maggiore precisione (sino al millimetro su singole misure);
- stima e rimozione dei contributi atmosferici.

Nei confronti di altre tecniche tradizionali di monitoraggio delle deformazioni del terreno i principali vantaggi possono essere così schematizzati:

- presenza di un archivio storico (dal 1992), da cui la possibilità di indagini su fenomeni passati;
- misure differenziali con precisione elevata sul *trend* di deformazione con velocità media PS fino a 0,1 mm/anno e sulla singola misura spostamento verticale PS fino a 1 mm e spostamento est-ovest fino a 1 cm;
- elevata densità spaziale di capisaldi radar, in area urbana fino a  $\sim 400$  PS/km<sup>2</sup>, già presenti sul territorio;
- abbattimento dei costi e dei tempi di indagine su larga scala per la zonazione del territorio;
- integrabilità in ambiente GIS;
- applicazioni sinergiche con altre tecniche di rilevamento;
- accuratezza verticale delle misure superiore rispetto alla tecnica GPS.

### 1.2.2 LIMITI

È importante sottolineare anche i limiti della Tecnica PS che consistono nella facoltà di apprezzare la deformazione lungo la direzione LOS, cioè approssimativamente lungo la verticale, salvo il caso di analisi *ad hoc* di diverse geometrie di acquisizione, e nel fatto che per portare a termine con successo l'analisi PS è necessario che l'area oggetto di studio presenti una densità sufficiente di diffusori permanenti (quantomeno lieve urbanizzazione oppure presenza di rocce esposte). Inoltre, per l'analisi di fenomeni di deformazione con evoluzione particolarmente rapida (ad es. un improvviso fenomeno di subsidenza), il problema legato all'equivocazione di fase può complicare notevolmente l'interpretazione dei risultati come in tutti i sistemi di tipo coerente. La tecnica interferometrica SAR consente infatti di valutare con accuratezza millimetrica variazioni di distanza sensore-bersaglio pari ad una frazione della lunghezza d'onda (5.66 cm per i satelliti ESA-ERS), ma eventuali "salti" di diversi centimetri vengono "equivocati" ovvero non è possibile "contare" il numero intero di lunghezze d'onda. Al limite, se il bersaglio si muovesse esattamente di mezza lunghezza d'onda (2.8 cm per i satelliti ERS) non risulterebbe possibile misurare alcuna variazione di fase rispetto al caso di bersaglio fermo. Il passaggio dei satelliti (*revisiting time*) pari a 35 giorni impedisce inoltre di osservare situazioni di pericolo che richiedono un monitoraggio in tempo reale.

Riassumendo, i limiti riguardano:

- moti rapidi (superiori a 1 cm/35 giorni) che non possono essere monitorati senza informazioni “a priori”;
- monitoraggio in “tempo reale” impossibile con l’attuale frequenza del dato (35 giorni) anche se è possibile integrare più geometrie di acquisizione;
- assenza di misure in aree senza bersagli radar (necessità di installare capisaldi artificiali);
- difficile previsione della posizione dei PS su aree non urbane;
- necessità di un’elaborazione minima di 25-30 immagini radar;
- carico computazionale elevato.

### 1.2.3 ACCURATEZZA DELLE STIME

Grazie a numerosi progetti ed analisi svolte sia in ambito commerciale che nel contesto di attività di ricerca, TRE e POLIMI hanno potuto effettuare una serie di esaustive analisi e confronti volti a stabilire l’accuratezza che è possibile ottenere utilizzando la tecnica PS. Queste validazioni hanno messo in luce la qualità e consistenza dei risultati ottenuti, dimostrando che la tecnica PS è una valida alternativa a metodi di monitoraggio convenzionali e più conosciuti quali per esempio GPS e livellazione topografica. I parametri che caratterizzano l’accuratezza delle misure PS possono essere schematizzati come segue:

#### 1. Precisione delle velocità stimate:

due sono le cause che concorrono a degradare la stima delle velocità: disturbo atmosferico e rumore di decorrelazione. Il disturbo atmosferico ha un comportamento di tipo passa-basso spaziale, e quindi produce un contributo simile per tutti i PS che distano tra loro di una distanza inferiore a circa 1 km. Tale disturbo si traduce in una polarizzazione sistematica dei valori di fase, e conseguentemente dei valori di velocità stimati. Il rumore di decorrelazione ha invece un comportamento totalmente diverso, risultando spazialmente incorrelato e indipendente dal disturbo atmosferico, e presenta generalmente potenze molto basse ( $\sigma_{\text{noise}} < 0.3$  rad). Questi due fattori rendono quindi necessario distinguere tra la dispersione dei valori di velocità rispetto ad un punto di riferimento (per esempio il punto di riferimento utilizzato nella catena di elaborazione che costituisce la tecnica PS) e la precisione tra due PS vicini tra loro. In quest’ultima situazione, usando un *dataset* composto da almeno 30 scene SAR, l’errore nella stima della velocità relativa tra due PS vicini (posti a distanza inferiore ad 1 km)

è generalmente inferiore a  $\pm 0.1$  mm/anno. Nonostante che in entrambi i casi l'accuratezza dei risultati dipenda dal numero di immagini utilizzate nell'elaborazione, la valutazione dell'errore di velocità rispetto al punto di riferimento è molto più complessa perché dipende dalla distanza da esso (come accade del resto in ogni rete geodetica) e dalla potenza del rumore atmosferico, che differisce da un'immagine ad un'altra. I risultati ottenuti dall'elaborazione vengono forniti con un'immagine che mostra la variazione della potenza dell'errore commesso nella stima delle velocità in funzione della distanza dal punto di riferimento.

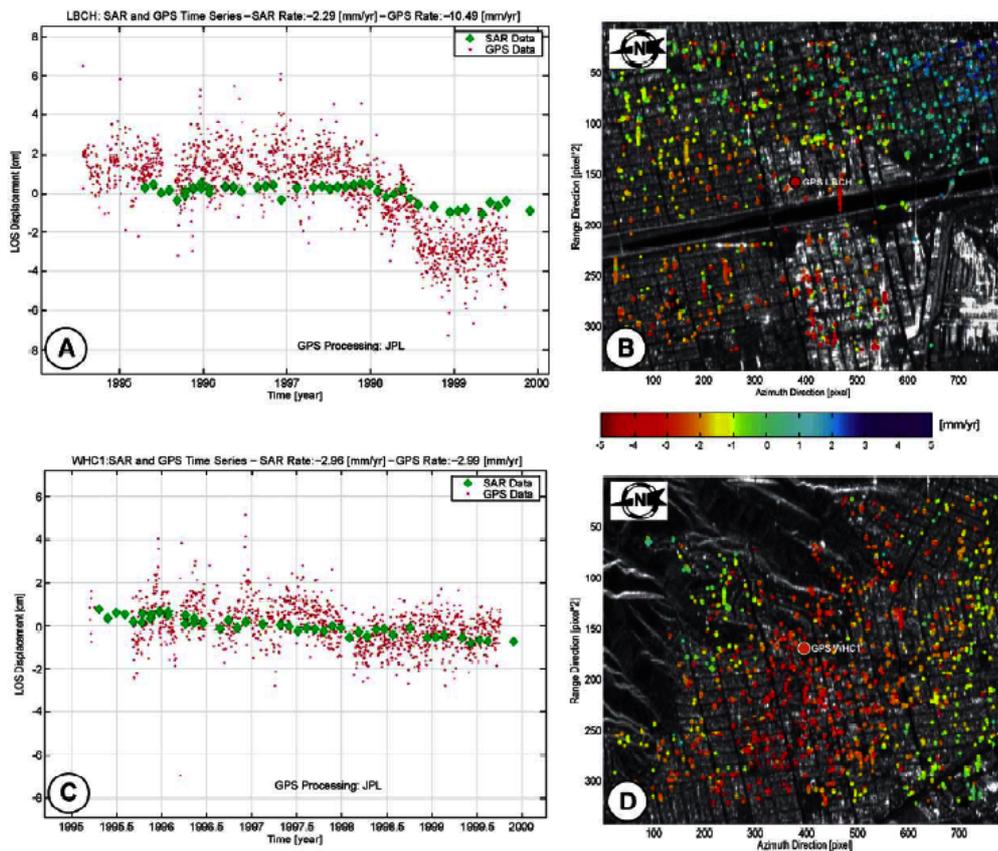


Figura 8: (A) e (C) confronto tra misure GPS e PS. (B) e (D) Zoom sulle zone dove sono installati i caposaldi GPS (Colesanti et al., 2003).

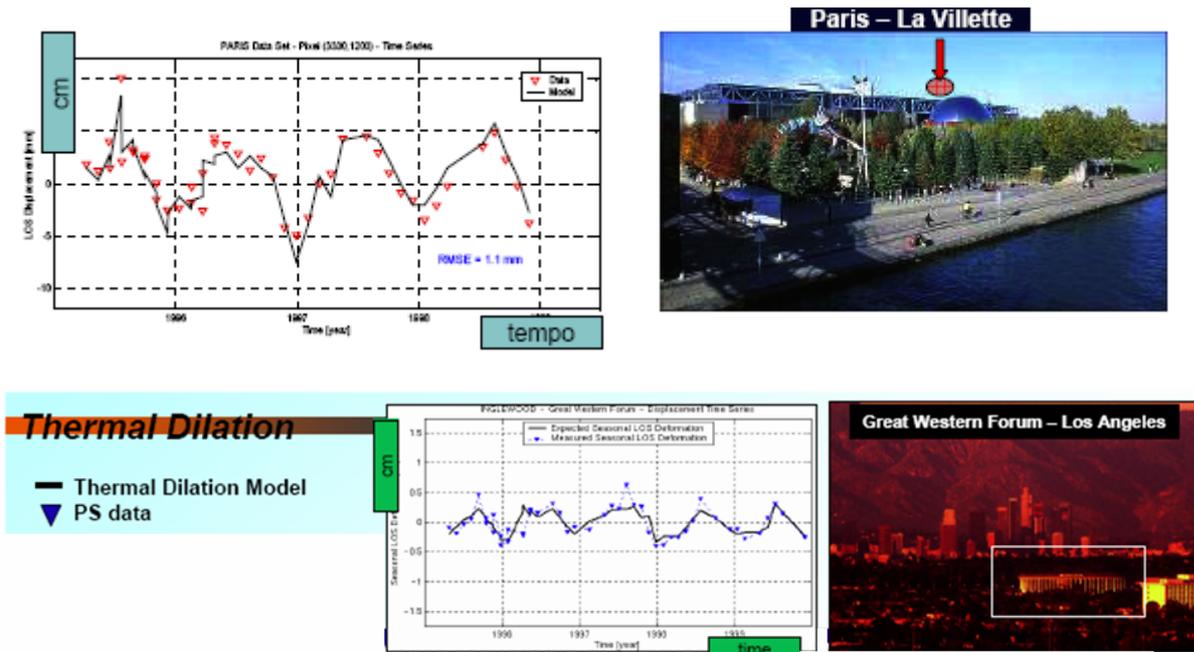


Figura 9: confronto tra misure PS di deformazione di strutture in acciaio (La Villette, Parigi (sopra) e Great Western Forum, Los Angeles (sotto)) e modelli di dilatazione termica delle strutture applicati ai dati di temperatura.

## 2. Precisione delle quote stimate:

le considerazioni riguardanti l'accuratezza nella stima dei valori di velocità possono essere estese per definire l'accuratezza delle quote stimate in corrispondenza dei PS. L'errore relativo tra punti posti ad una distanza inferiore ad 1 km è generalmente minore di  $\pm 1.5$  m, tale errore cresce all'aumentare della distanza dal punto di riferimento.

## 3. Precisione di geocodifica:

è possibile definire un errore di posizionamento assoluto (rispetto al punto di riferimento utilizzato nell'elaborazione) e un errore di posizionamento relativo (tra PS vicini). A causa di possibili inaccuranze nella stima dei parametri orbitali è possibile che i risultati non siano perfettamente allineati alla griglia di riferimento. In questo caso il problema può essere facilmente superato applicando una traslazione rigida a tutti i PS. L'errore di posizionamento assoluto dipende quindi dall'accuratezza del *layer* di riferimento utilizzato. L'errore di posizionamento relativo è dettato dalla risoluzione del sistema SAR utilizzato, ed è pari a  $\pm 10$  m nella direzione di *range* (direzione est-ovest), e  $\pm 2$  m nella direzione di *azimut* (direzione nord-sud).

## 1.2.4 STRATEGIE DI ELABORAZIONE

In accordo con le specifiche offerte da TRE l'analisi PS si differenzia in due diversi approcci di elaborazione:

1. SPSA – *Standard Permanent Scatterers Analysis*, per applicazioni su larga scala
2. APSA – *Advanced Permanent Scatterers Analysis*, per applicazioni ad alta risoluzione su aree limitate.

### SPSA – Caratteristiche generali

Analisi volta ad identificare la presenza di zone stabili o instabili all'interno di un'area di interesse di grandi dimensioni. L'obiettivo è quello di fornire una mappatura del territorio per evidenziare aree a rischio o comunque fenomeni di deformazione superficiale estesi. Vengono identificati i PS ad alta affidabilità e misurate le velocità medie annue di deformazione con una procedura standard, che consente di elaborare grandi quantità di dati relativi ad aree molto estese in tempi limitati. Dati tecnici dell'analisi sono mostrati in Tabella 1.

Parametro	Valore
Dimensioni area minima:	100 km <sup>2</sup>
Dimensioni area massima:	-
Risoluzione della cella SAR al suolo:	ca. 4x10 m (fattore di interpolazione in direzione di range pari a 2)
Modello del moto del Permanent Scatterers:	lineare
Stima del disturbo atmosferico:	griglia standard

Tabella 1: caratteristiche analisi SPSA.

### APSA – Caratteristiche generali

Indagine più sofisticata, indicata per aree limitate per le quali è necessario massimizzare il contenuto informativo. Richiede tempi computazionali consistenti ed una intensa interazione con un utente esperto per la valutazione accurata dei movimenti individuati. La procedura seguita è specifica per ciascuna area. Un'analisi "*advanced*" è fortemente consigliata a seguito di un'analisi "*standard*", con la quale si ottiene una zonazione del territorio, per focalizzare le aree di maggiore interesse ed eseguire indagini approfondite sui fenomeni in essere rilevabili con la tecnologia SAR. I dati tecnici dell'analisi sono illustrati in Tabella 2.

<b>Parametro</b>	<b>Valore</b>
Dimensioni area minima:	1 km <sup>2</sup>
Dimensioni area massima:	100 km <sup>2</sup>
Risoluzione della cella SAR al suolo:	ca. 4x5 m (fattore di interpolazione in direzione di range pari a 4)
Modello del moto del Permanent Scatterers:	estensione per moti non lineari
Stima del disturbo atmosferico:	griglia ad alta risoluzione

Tabella 2: caratteristiche analisi APSA.

## 2 BIBLIOGRAFIA

Alexander, D., 1989. Urban landslides. *Progress in Physical Geography*, 13, 157-191.

Alexander, D., 2005. Vulnerability to landslides. Chapter 5, 175-198, in T. Glade, M. Anderson, and M. Crozier (eds.), *Landslide Hazard and Risk*. Wiley, Chichester, U.K.

Berti G., Canuti, P. & Casagli, N., 2002. Criteri per la previsione e la prevenzione del rischio connesso agli sprofondamenti catastrofici, *Le Voragini Catastrofiche: un nuovo problema per la Toscana*. Edizioni Regione Toscana, 82-95.

Canuti P. & Casagli N., 1994. Considerazioni sulla valutazione del rischio da frana. Atti del convegno "Fenomeni franosi e centri abitati", Bologna 27 maggio 1994, Regione Emilia Romagna e CNR – Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche.

Canuti, P. & Menduni, G., 2005. Programma comune per l'integrazione e l'aggiornamento della cartografia del rischio da frana del Piano di Bacino, 274. Report Interno Autorità di Bacino del Fiume Arno.

Colesanti C., Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2003. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology*, 68 (2003) 3 –14.

DRM - Délégation aux Risques Majeurs, 1988. Evaluation de la vulnérabilité. Plan d'Exposition aux Risques. Ministère de l'Environnement. Direction de l'Eau et de la Prévention des Pollutions et des Risques. La Documentation Française. (1988), 112.

DRM - Délégation aux Risques Majeurs, 1990. Les études préliminaires à la cartographie réglementaire des risques majeurs. Secrétariat d'Etat auprès du Premier ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques technologiques et naturels majeurs. La Documentation Française (1990), 143.

Fell R., 1994. Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian geotechnical journal*, 31(2), 261-272.

Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent Scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39 (1), 8–20.

Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 1999. Multibaseline InSAR DEM reconstruction: the wavelet approach. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 37 (2), 705–715.

Glade, T., Anderson, M., Crozier, M.J., 2005. *Landslide hazard and risk*. John Wiley & Sons.

Massonnet, D., Feigl, K.L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.*, 36.

Murakami, S., Yasuhara, K. 2000. GIS for land subsidence evaluation in northern Kanto plain, Japan. *Proc. of the Sixth International Symposium on Land Subsidence, Ravenna, 24-29 September 2000*, 2, 219-228.

Murakami, S., Yasuhara, K., Mochizuki, N., 2002. An observational prediction of land subsidence for a GIS-aimed monitoring system of groundwater level. *Lowland Technology International*, 4 (1), 46-61.

Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodriguez, E., Goldstein, R.M., 2000. Synthetic aperture radar interferometry. *Proc. I.E.E.E.* 88 (3).