

1 MAPPA DELLE VELOCITA' DI SUBSIDENZA

E' stata realizzata una banca dati geografica della deformazione dell'intero bacino del fiume Arno a partire dall'analisi Permanent Scatterers Standard (SPSA) di dati ERS acquisiti nell'intervallo temporale 1992-2002

Le attività incluse all'interno del pacchetto possono essere schematizzate come segue:

1. selezione delle immagini ERS1 ed ERS2 acquisite sull'intero bacino del F. Arno;
2. elaborazione delle immagini radar mediante la tecnica dei PS, in modalità SPSA;
3. analisi GIS del data-base di punti PS per la rimozione di offset ed *outlier*;
4. interpolazione dei dati PS al fine di ottenere mappe di subsidenza;

1.1 Selezione delle immagini SAR

Per l'analisi sono stati acquisiti dati sull'intero bacino del Fiume Arno per il periodo compreso tra maggio 1992 e gennaio 2003. Per ottenere il massimo numero di capisaldi radar sono stati acquisite immagini sia lungo orbite discendenti (con acquisizione del satellite in direzione E-W) che ascendenti (acquisizione del satellite in direzione W-E). Infatti, a causa delle diverse direzioni di vista del satellite lungo le due orbite, diversi elementi riflettenti presenti sul terreno risultano essere dei PS, in funzione della loro geometria e della loro esposizione rispetto alla linea di vista del satellite. Elaborando *dataset* di immagini provenienti da entrambe le orbite è possibile ottenere la massima densità possibile di PS.

Per coprire l'intero territorio del bacino idrografico del Fiume Arno è stato necessario acquisire immagini provenienti da tre *track* differenti, sia per il *dataset* ascendente che per quello discendente, come è visibile nelle Figure 52 e 53. I *track* sono parzialmente sovrapposti.

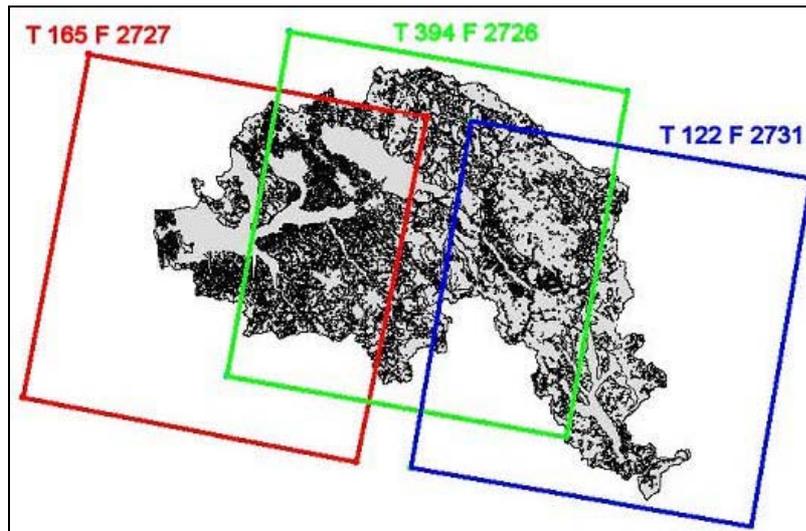


Figura 52: Copertura delle immagini ERS1-ERS2 del dataset discendente.

Track	Frame	Frame Shift	Numero di immagini	Copertura area di interesse (Km)
165	2727	0	90	4400
394	2727	-1	97	6200
122	2727	+4	82	3500

Tabella 8: tabella riassuntiva riguardante le caratteristiche delle immagini ERS1-ERS2 acquisite sul bacino lungo orbite discendenti.

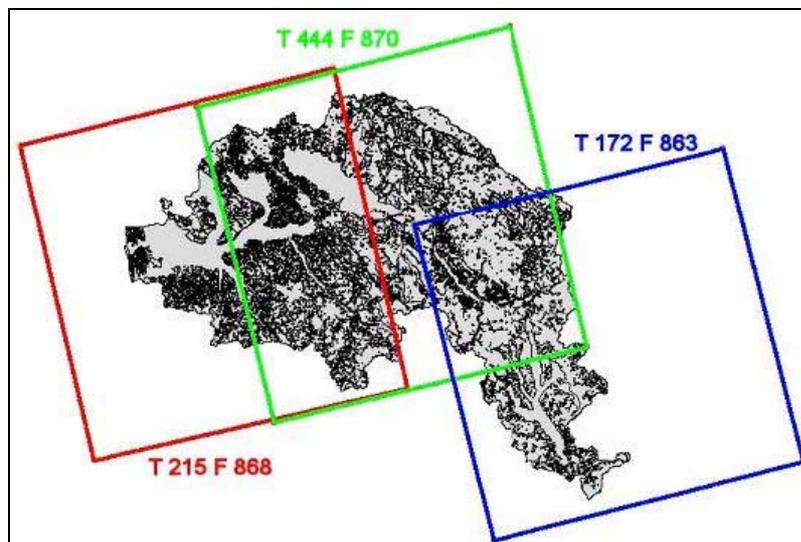


Figura 53: Copertura delle immagini ERS1-ERS2 del dataset ascendente.

Track	Frame	Frame Shift	Numero di immagini	Copertura area di interesse (Km)
215	873	-5	34	4900
444	873	-3	37	6900
172	855	+8	38	2500

Tabella 9: tabella riassuntiva riguardante le caratteristiche delle immagini ERS1-ERS2 acquisite sul bacino lungo orbite ascendenti.

Come riportato nelle Tabelle 8 e 9 le tre *track* discendenti sono caratterizzate da un numero di acquisizioni per track molto più elevato rispetto a quelle ascendenti (una media di 85 acquisizioni rispetto alle 35 ascendenti). Questa situazione, dovuta alla minore disponibilità di immagini acquisite lungo orbite discendenti all'interno degli archivi ESA, fa sì che i valori di velocità medie calcolate dal *dataset* discendente sia più preciso, per le ragioni spiegate nel paragrafo 2.2.

1.2 Elaborazione SPSA

Le immagini così selezionate sono state elaborate mediante una *Standard Permanent Scatterers Analysis* SPSA (vedi paragrafo 2.2.4). L'analisi ha permesso di individuare nell'area di studio una serie di punti o capisaldi "radar" caratterizzati sulle immagini SAR da elevati valori di energia retrodiffusa, sui quali è stato possibile misurare lo spostamento annuale medio durante il periodo di misura con un'accuratezza elevata (dell'ordine del millimetro). La densità spaziale di tali punti, che normalmente corrispondono sul terreno ad edifici, strutture metalliche o roccia esposta, è risultata sufficientemente elevata in corrispondenza delle aree maggiormente urbanizzate, mentre nelle aree agricole o comunque con poche strutture antropiche sono stati identificati solo pochi scatteratori. E' stato così ottenuto un *database* di circa 831.260 punti distribuiti all'interno dell'area di interesse (ca. 9131 km²), con una maggiore densità dei PS derivante dall'analisi dei dati discendenti (573.449 PS) rispetto agli ascendenti (257.813).

Dataset ascendente	Track	Dataset discendente	Track
Volterra	215	Pisa_july	165
Pistoia_215	215	Empoli_2_t165	165
Pisa	215	Volterra	165
Siena	444	Pistoia	394
Castelfiorentino	444	Empoli_1_t394	394
Pistoia_444	444	Casciano	394
Montevarchi	444	Stia	394
Firenze	444	Chiusi	122
Mugello	444	Arezzo	122
Montepulciano	172		
Arezzo	172		
Casentino	172		
Bibbiena	172		

Tabella 10: subset relativi al *dataset* ascendente e discendente.

Per problemi di eccessivo carico computazionale dei calcolatori su cui è stata realizzata l'elaborazione SPSA, ogni singola immagine è stata suddivisa in alcuni *subset*, come riportato in Tabella 10. Per i *dataset* discendenti sono stati creati in totale 9 sub-set appartenenti a 3 *track* (165, 394, 122) e per gli ascendenti 13 subset, appartenenti a 3 *track* (215, 444, 172).

1.3 Analisi GIS del database PS

In questa fase è necessario rendere omogenei i dati PS provenienti da diverse orbite (ascendenti e discendenti) o da *track* parzialmente sovrapposte. Le velocità fornite dai PS sono velocità relative e non assolute, cioè sono velocità differenziali calcolate rispetto ad un punto di riferimento, detto "*reference point*". Dataset diversi di PS avranno *reference points* diversi, per cui PS corrispondenti provenienti da due *track* diverse (cioè da due acquisizioni che hanno una parte comune di sovrapposizione) possono avere velocità leggermente differenti. Questo può essere indotto dal fatto che i *reference points* non siano perfettamente fermi, ma che siano affetti da un leggero movimento. E' necessario quindi stimare quanto sia tale differenza, valutandola statisticamente su punti vicini e rimuoverla, per poter rendere confrontabili diversi *dataset*.

Un altro fattore da tenere in considerazione è la possibilità di analizzare dei dati provenienti da un'area affetta da deformazioni regionali di origine tettonica, come quelle che interessano alcune porzioni dell'Appennino. Tali deformazioni, dell'ordine di pochi mm/anno, normalmente interessano zone abbastanza grandi ed omogenee dal punto di vista geologico (ad esempio bacini intermontani), per cui si riflettono come piccoli offset sulla velocità dell'intera popolazione di PS presenti in queste aree. Per poter effettuare un'analisi finalizzata all'identificazione di fenomeni di subsidenza indotti da attività antropica tali offset non costituiscono un problema, ma è possibile valutare statisticamente il loro valore medio, analizzando la distribuzione di frequenza della velocità, e rimuoverli.

Sia i *dataset* di PS discendenti che ascendenti sono stati analizzati da un punto di vista statistico facendo uso del *tool* di ARCGIS *Geostatistical Analysis*. Osservando l'istogramma di frequenza delle velocità dei PS ed il valore di velocità più frequente, ed assumendo che la maggior parte dei PS abbia una velocità nulla, è stato calcolato e sottratto per ogni *dataset* un offset di velocità. In Tabella 11 e 12 sono riportati gli offset di tutti i *dataset*.

In Figura 54 viene mostrato un esempio di valutazione dell'offset di velocità di un *dataset*.

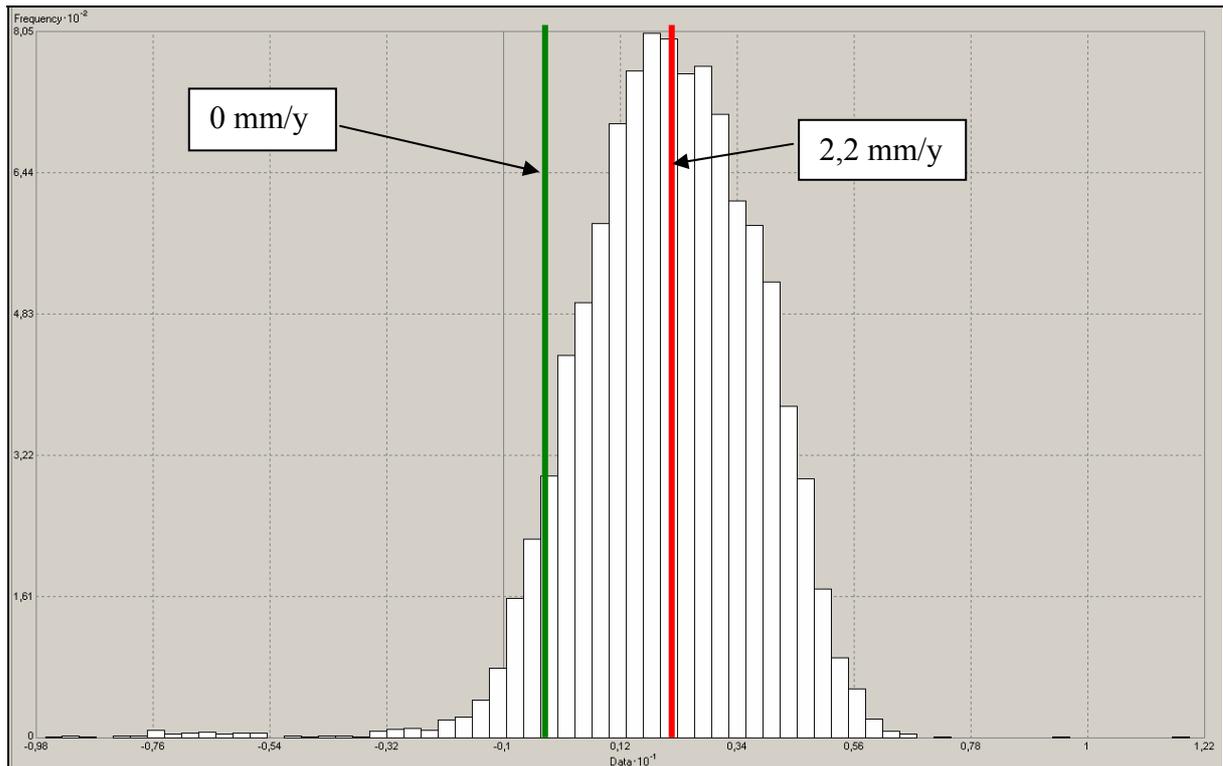


Figura 54: istogramma di frequenza dei valori di velocità del *dataset* ascendente “Bibbiena”. Il valore di *offset* stimato è pari a 2.2 mm/y.

Come per il *dataset* APSA del WP1, anche per quelli SPSA del WP3, la visualizzazione dei *dataset* di Permanent Scatterers in ambiente GIS ed un'analisi statistica dei dati hanno permesso di notare la presenza di alcuni PS caratterizzati da anomali valori di velocità media annua rispetto alla media degli altri circostanti PS. Molto probabilmente questi punti non rappresentano reali scatteratori, e di conseguenza non sono attendibili capisaldi su cui misurare le deformazioni. Una volta identificati, mediante i *tool* di ARCGIS *Geostatistical Analyst's Trend Analysis e Histogram Tool*, gli *outlier* sono stati eliminati.

Nelle Tabelle 11 e 12 sono riportati per ogni *dataset* gli *offset* ed il numero degli *outlier*.

In Figura 55 e 56 sono riportati i grafici utilizzati per l'individuazione degli *outlier*. Un file separato contenente solo gli *outlier* è stato creato al fine di lasciare la possibilità di verificare in campagna tali punti.

Dataset discendenti	Offset Vel => Vel_mod	Track	Outliers
Pisa_july	-1.62	165	Track 165 217 outliers
Empoli_2_t165	-0.18	165	
Volterra	+3.88	165	
Pistoia	-2.00	394	Track 394 9 outliers
Empoli_1_t394	-0.35	394	
Casciano	+0.27	394	
Stia	-0.74	394	
Chiusi	-0.37	122	Track 122 6 outliers
Arezzo	+0.60	122	

Tabella 11: *offset ed outlier dei dataset discendenti.*

Ascending datasets	Offset Vel => Vel_mod	Track	Outliers
Volterra	-0.10	215	Track 215 17 outliers
Pistoia_215	+0.60	215	
Pisa	+0.40	215	
Siena	-0.30	444	Track 444 126 outliers
Castelfiorentino	+0.50	444	
Pistoia_444	-1.20	444	
Montevarchi	-0.30	444	
Firenze	-0.70	444	
Mugello	+0.40	444	
Montepulciano	+1.30	172	
Arezzo	+0.50	172	
Casentino	-0.30	172	
Bibbiena	-2.20	172	

Tabella 12: *offset ed outlier dei dataset ascendenti.*

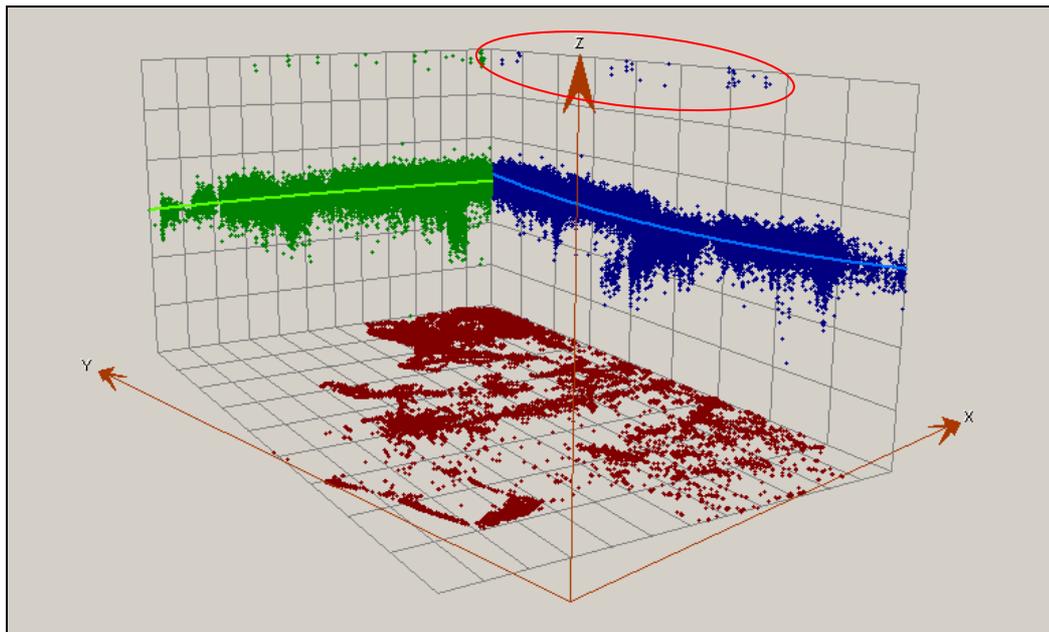


Figura 55: grafico ottenuto mediante il *Trend Analysis Tool*. L'ellisse rossa evidenzia i PS con valori di velocità anomali del *dataset* discendente "Pisa".

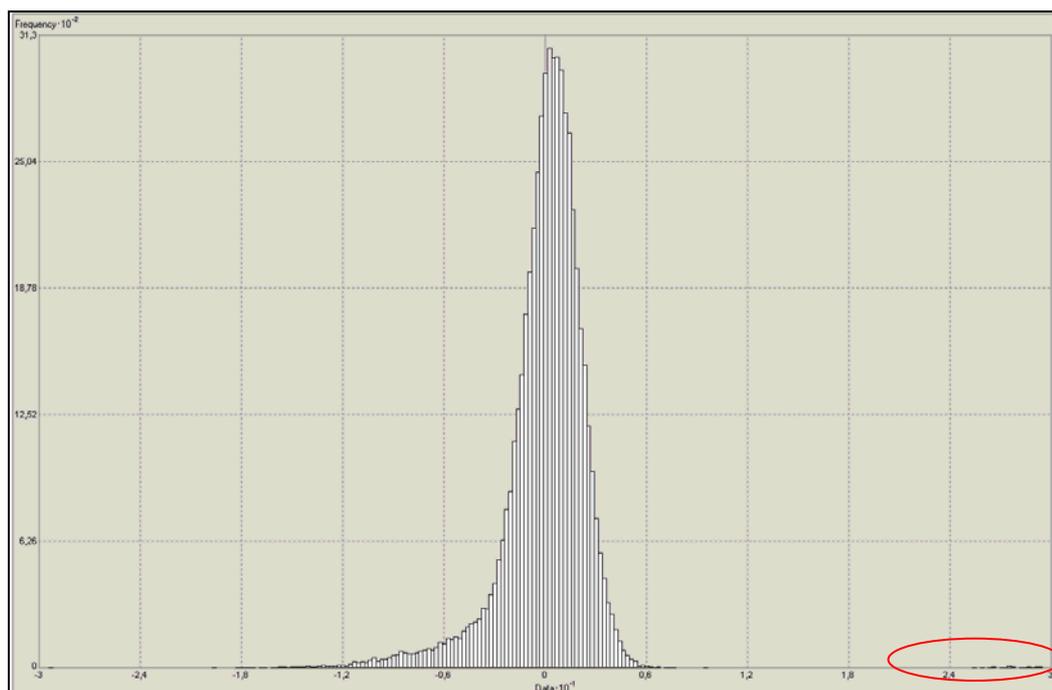


Figura 56: distribuzione di frequenza delle velocità del *dataset* SPSA discendente "Pisa". Gli *outlier* sono caratterizzati da valori estremamente elevati di velocità (ellisse rossa).

La distribuzione spaziale degli *outlier* dei *dataset* ascendenti e discendenti è riportata in Figura 57.

Una volta eliminati offset ed *outlier* i differenti *dataset* appartenenti ad uno stesso track sono stati uniti tramite un operazione di "merging" realizzata in ambiente GIS, ottenendo alla fine tre *dataset* di PS discendenti e 3 di PS ascendenti, come riportato in Figura 58.

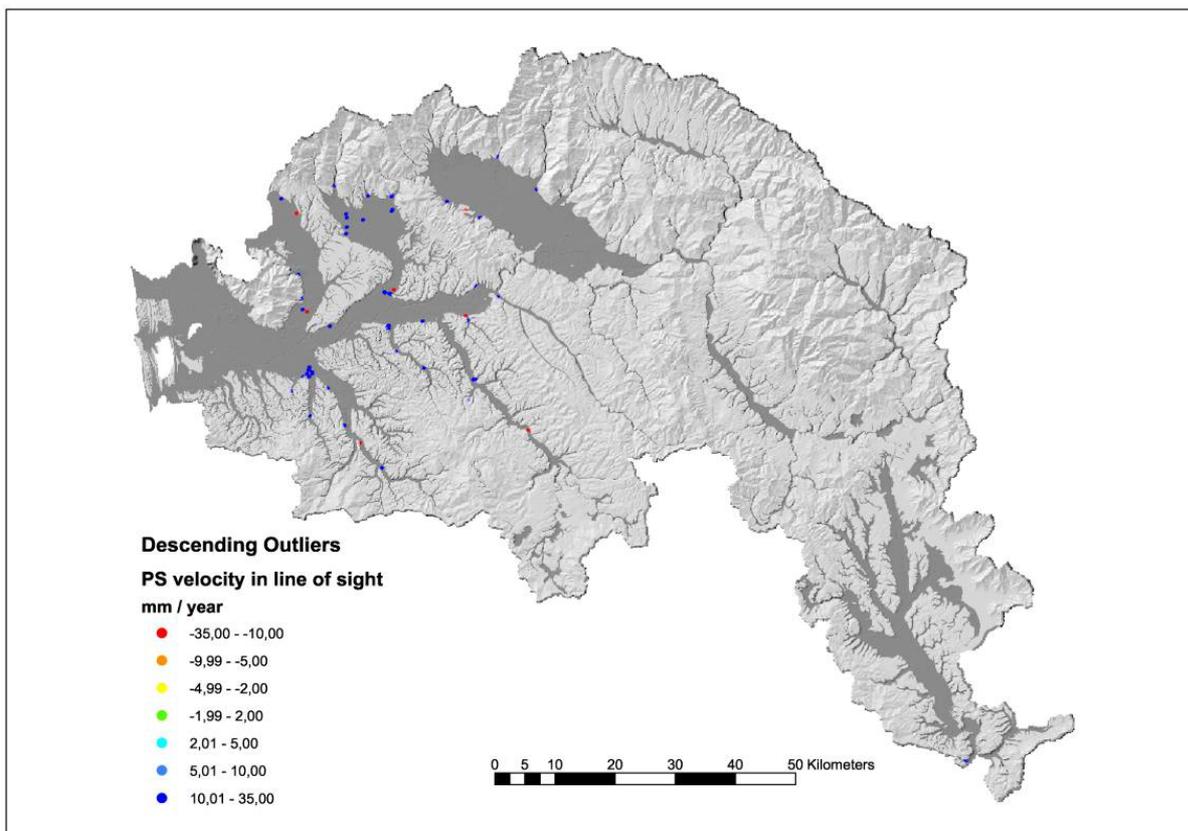
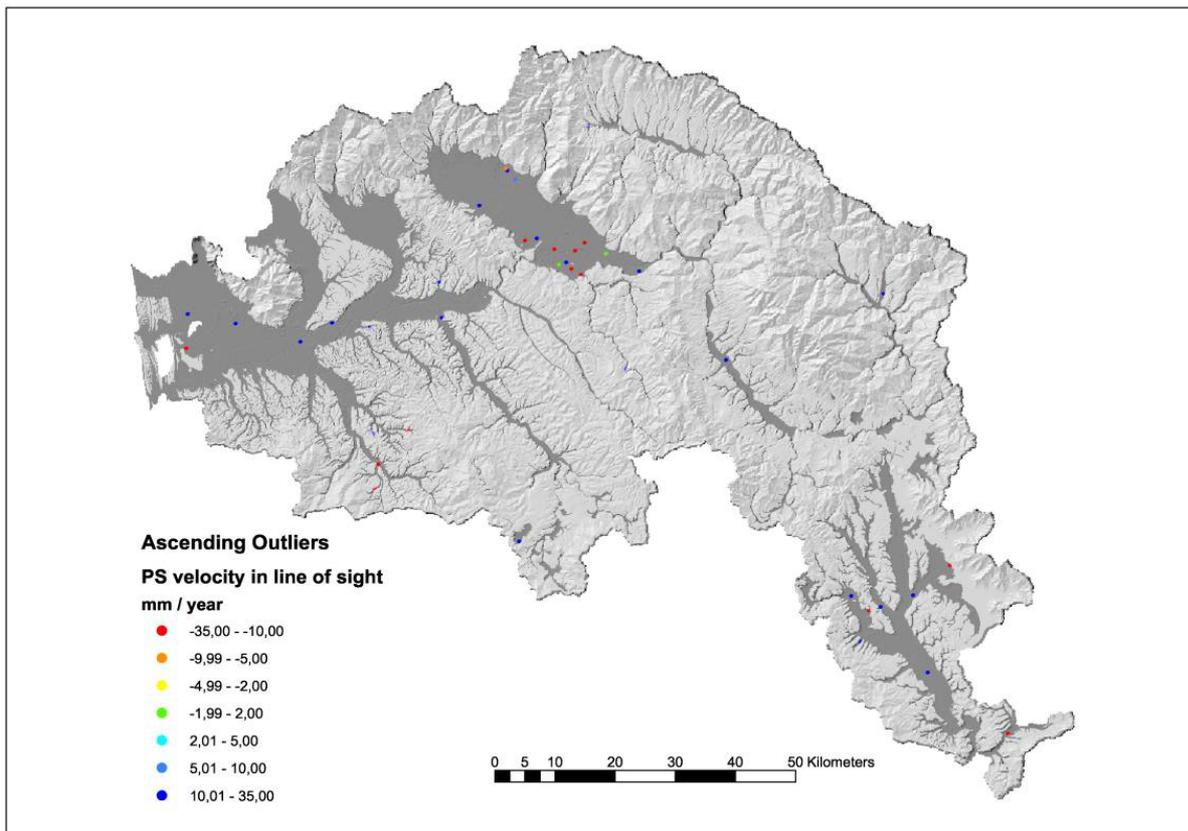


Figura 57: Distribuzione spaziale dei PS outlier dei dataset ascendenti (sopra) e discendenti (sotto).

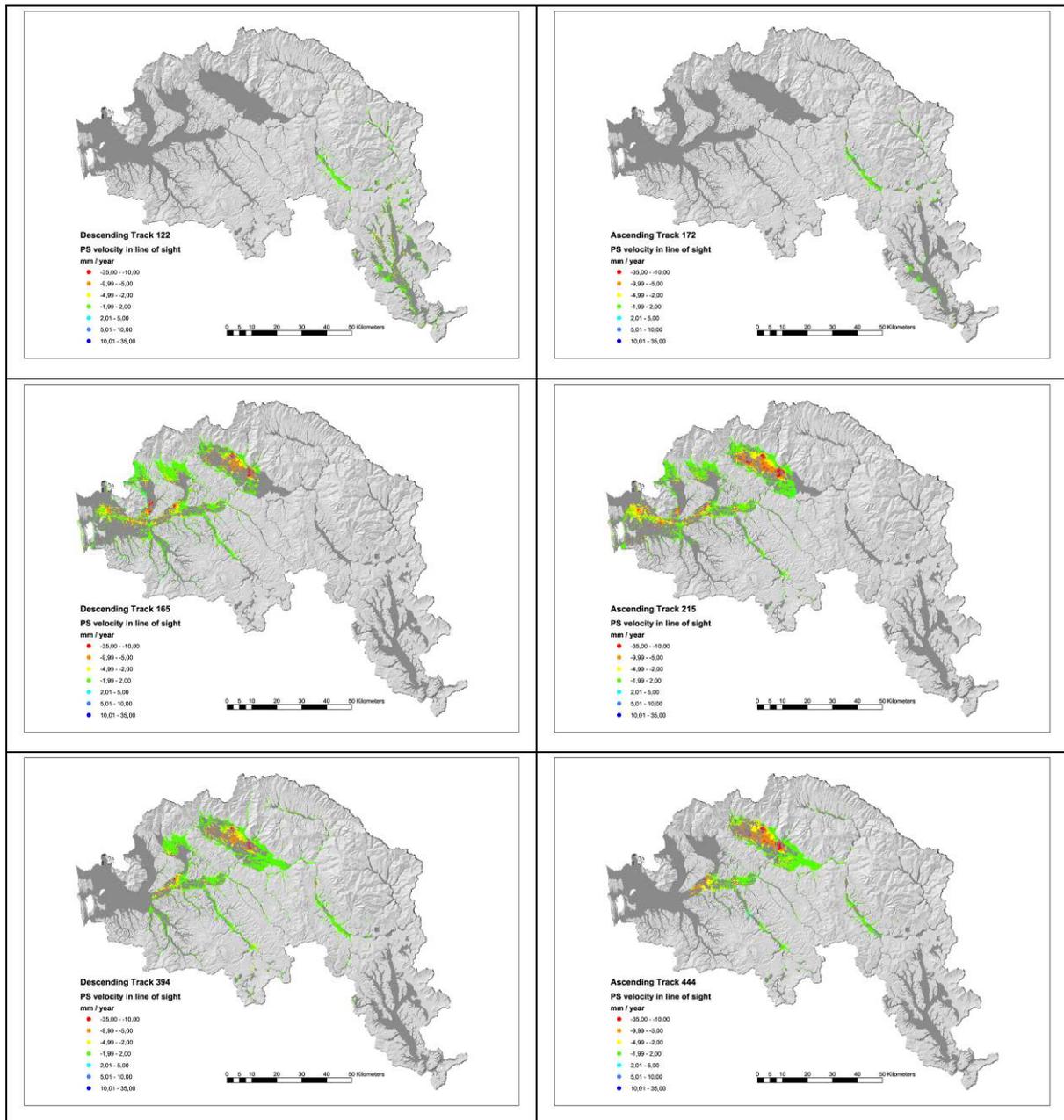


Figura 58: *Dataset* di PS discendenti (colonna di sinistra, dall'alto verso il basso *track* 122, 165, 394) ed ascendenti (colonna di destra, dall'alto verso il basso *track* 172, 215, 444) per l'intero bacino del F. Arno

Al fine di limitare l'analisi delle deformazioni alle sole aree di pianura, è stato utilizzato il file chiamato "Buti", fornito dall'Autorità di Bacino ed sono stati solamente selezionati i PS che ricadono all'interno di questa area. In questa maniera il numero di PS finale, utile per lo studio dei fenomeni di subsidenza, è arrivato ad essere pari a 438.926, distribuiti in 260.579 per i *dataset* discendenti e 178.347 per quelli ascendenti. Il numero di PS all'interno dell'area identificata dal file Buti rappresenta il 52% dell'intero *dataset* di PS identificati nel bacino del F. Arno.

1.4 Interpolazione dei PS

Le attività effettuate includono la creazione di una mappa di sintesi delle deformazioni del terreno sull'intero bacino del fiume Arno, a partire dai dati puntuali di deformazione forniti dall'analisi SPSSA. A tal fine è stato necessario applicare degli algoritmi di interpolazione spaziale dei dati. La qualità dell'interpolazione è chiaramente legata alla densità dei PS che in alcune zone è estremamente elevata, mentre in altre, a causa dell'assenza di edifici o elementi riflettenti sul terreno, è abbastanza bassa. Per effettuare l'interpolazione è stato usato l'algoritmo di “*radial basis functions – RBF*”.

Per interpolare i dati sull'intero bacino è stato utilizzato l'algoritmo “RBF - *Radial Basis Function*” di ARCGIS *Geostatistical Analyst*. Anche questo algoritmo è un interpolatore esatto come spiegato nel capitolo 3.4 per IDW. Rispetto all'IDW l'algoritmo RBF usa un'altra funzione matematica. Mentre l'algoritmo IDW non può produrre i valori interpolati sopra il massimo o sotto il minimo valore dei dati originali, l'algoritmo RBF può predire questi valori.

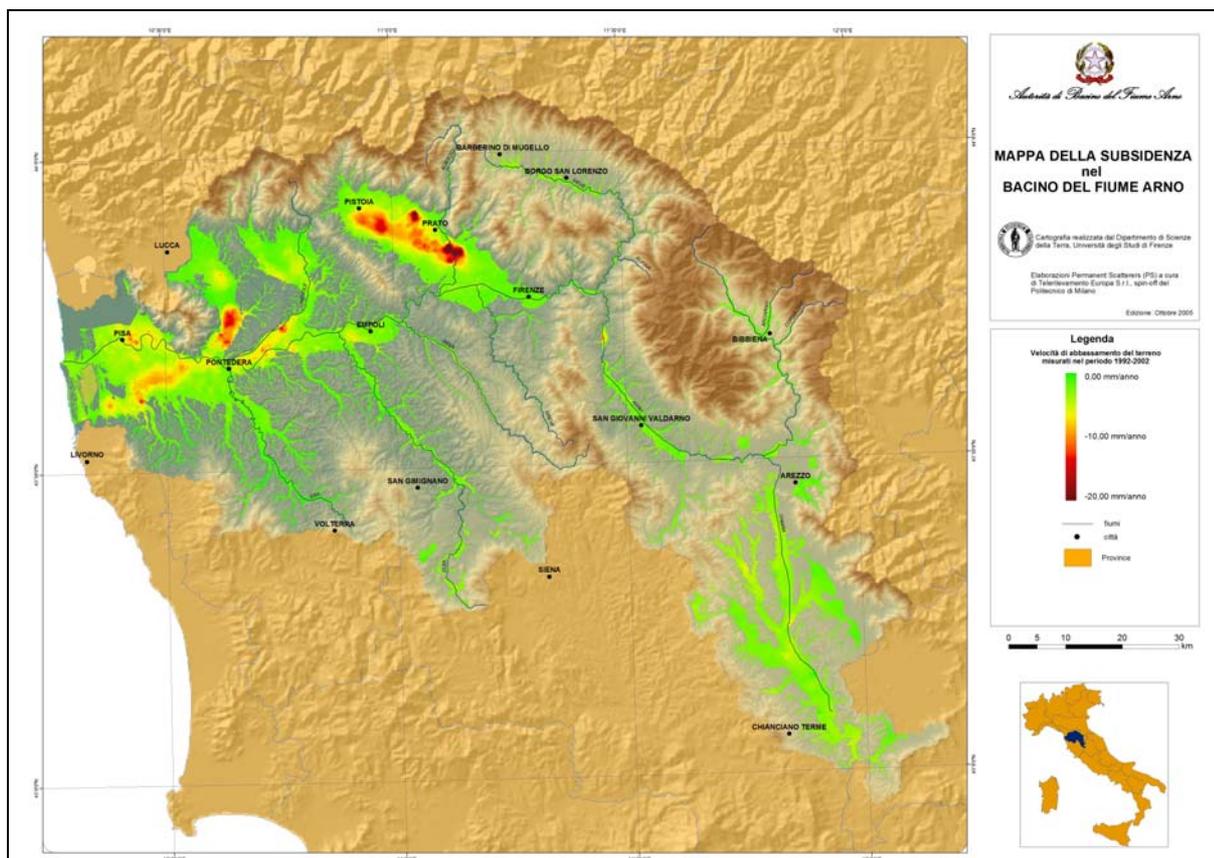


Figura 59: mappa della subsidenza nel bacino del fiume Arno

Questo algoritmo è adatto per i dataset molto grandi, soprattutto se i valori non cambiano in maniera significativa sulla breve distanza. Per questo è stato per interpolare i dati di *Standard PS Analysis* (SPSA). I valori di velocità (lungo la linea di vista del satellite) sono stati proiettati lungo la direzione verticale presumendo il movimento del terreno sia soltanto verticale. Per questo è usato un fattore di 1,08636 ($1/\cos 23^\circ$), perché l'angolo dell'incidenza di ERS è 23° . L'interpolazione è stata elaborata per tutto il bacino senza dividerlo in diversi sottobacini.

Come già spiegato in capitolo 3.4. il parametro "*search neighborhood*" è importante per i risultati dell'interpolazione. In questo caso la distanza massima dei punti utilizzati è stata 2000 m. Inoltre il numero minimo di punti è stato 64.

Il prodotto finale consiste in una mappa delle aree affette da subsidenza che viene riportata in Figura 59 ed Appendice 2.3.

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).