

Appendice 3 - Linee guida per l'utilizzo dei dati di deformazione (PS) derivati da analisi multi-interferometrica di immagini radar satellitari



1. Generalità sui sistemi radar satellitari

I sistemi radar satellitari sono costituiti da sensori di tipo attivo e forniscono immagini elettromagnetiche della superficie terrestre con risoluzione spaziale dell'ordine del metro. Le lunghezze d'onda utilizzate per l'analisi di movimenti del terreno rientrano nel campo delle microonde, generalmente comprese tra 2 e 20 cm (frequenze tra 1,5 e 15GHz), caratteristica fondamentale per apprezzare spostamenti millimetrici.

Un aspetto molto importante di questo sistema di acquisizione è dato dal fatto che, rispetto ai più noti sistemi ottici, opera con continuità, potendo acquisire dati anche in presenza di copertura nuvolosa e sia di giorno che di notte. Inoltre, i sistemi radar montati sui satelliti, denominati SAR ovvero radar ad apertura sintetica, operano in modo tale che uno stesso punto P ubicato sulla superficie terrestre venga illuminato più volte dal radar in movimento, in modo da simulare un'antenna di grosse dimensioni che permette di ottenere un'elevata risoluzione geometrica.

I satelliti con a bordo sistemi di acquisizione radar percorrono orbite eliosincrone lievemente inclinate rispetto ai meridiani, illuminando, da una quota di circa 800 km, una striscia di terreno larga circa 100 km (satelliti ERS-ENVISAT). La direzione della congiungente sensore bersaglio (LOS) risulta perpendicolare alla direzione dell'orbita (azimut) ed è generalmente inclinata di un determinato angolo rispetto alla verticale detto off-nadir (Figura 1A) che, nel caso dei satelliti ERS ed ENVISAT, risulta essere di circa 23°.

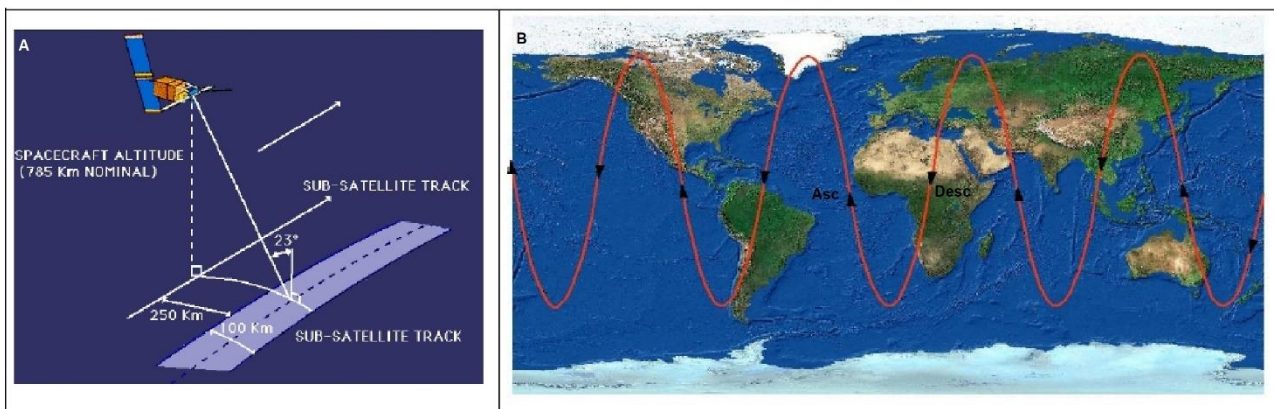


Figura 1 – Geometria di acquisizione del satellite ERS (A) e andamento planimetrico generale delle orbite eliosincrone dei satelliti SAR

La stessa orbita viene ripercorsa dopo un determinato intervallo di tempo, detto tempo di rivisitazione, consentendo così di acquisire dati relativi alla stessa scena al suolo in tempi differenti.

Dalla combinazione della rotazione terrestre con le orbite eliosincrone dei satelliti risulta che la stessa area della superficie terrestre viene illuminata dalla radiazione radar sia durante un passaggio del satellite da nord verso sud, denominata orbita discendente, sia durante un passaggio del satellite da sud verso nord, denominata orbita ascendente (Figura 1B). La possibilità di acquisire dati sulla stessa scena nelle due geometrie è molto importante perché permette di analizzare uno stesso fenomeno da due diversi punti di osservazione, permettendo di superare alcuni inconvenienti legati ad orientazione e geometria del versante. Infatti, il sensore radar si trova collocato sulla destra rispetto al senso di marcia del satellite e questo fa sì che in geometria ascendente la scena sia osservata da ovest verso est, mentre in geometria discendente sia osservata da est verso ovest (Figura 2).

Il sistema di acquisizione radar non perpendicolare al suolo fa sì che nelle aree collinari e montane possano verificarsi alcuni effetti di distorsione nelle immagini di ampiezza che sono denominati foreshortening, layover e shadowing.

L'effetto di foreshortening si verifica quando la pendenza del terreno tende ad essere perpendicolare alla congiungente sensore-bersaglio, facendo sì che il contributo di molti punti si concentri in poche celle producendo pixel molto luminosi che non permettono di discriminare i diversi contributi. I sistemi radar satellitari, al contrario di quelli ottici, tendono infatti a risolvere meglio situazioni dove il versante viene osservato con bassa inclinazione rispetto alla linea di vista del satellite e per tale motivo i versanti esposti ad est vengono generalmente risolti meglio in geometria ascendente, mentre quelli esposti ad ovest in geometria discendente; pertanto avere le immagini acquisite in entrambe le geometrie permette di migliorare notevolmente la risoluzione geometrica del fenomeno che vogliamo esaminare.

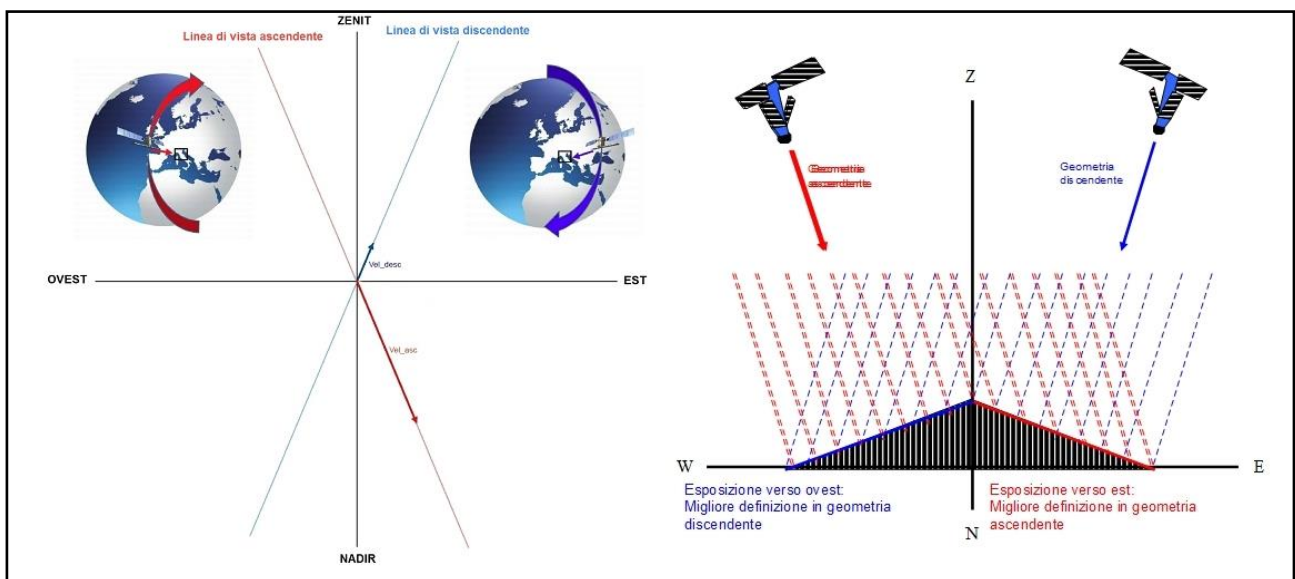


Figura 2 – Schematizzazione delle due geometrie di acquisizioni dei satelliti con strumentazione SAR

L'effetto di layover si verifica invece quando la pendenza del terreno è maggiore dell'angolo che la linea di vista del satellite forma con la verticale, determinando una forte distorsione dell'immagine che non permette la sua corretta interpretazione.

L'effetto di shadowing invece non produce deformazioni di tipo prospettico come i due precedenti, ma si verifica quando alcune zone non possono essere illuminate dal radar perché schermate da altri oggetti (zone in ombra), producendo aree molto scure nelle immagini di ampiezza.

Nel caso si voglia programmare l'acquisizione di immagini radar su una determinata area per effettuare elaborazioni interferometriche, risulta quindi molto importante tenere conto degli effetti sopra descritti per verificare l'effettiva copertura dell'informazione ottenibile. A tal fine è possibile realizzare delle mappe che, in funzione di alcuni parametri morfologici (pendenza ed esposizione dei versanti) e delle caratteristiche geometriche del sistema di acquisizione satellitare, permettono di individuare le aree esenti da effetti di distorsione (mappe di Layover e Shadow). Lo scopo di questo lavoro peraltro è quello di fornire un supporto all'utilizzo dei dati esistenti, già elaborati nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (vedi paragrafo 3.1) e del Piano di Monitoraggio radar satellitare della Regione Toscana (paragrafo 3.2), per cui tali aspetti non verranno trattati (per approfondimenti vedi Cascini et al, 2010).

2. Interferometria radar differenziale

La tecnica tradizionale utilizzata per l'individuazione di aree soggette a movimenti superficiali è l'interferometria radar differenziale, che si basa appunto sull'osservazione dell'evoluzione del valore di fase tra due distinte acquisizioni, in modo da mettere in luce eventuali differenze di posizione del bersaglio riconducibili a fenomeni di deformazione topografica.

2.1. Concetti generali

In Figura 3 è schematizzato il sistema di funzionamento generale del sistema SAR satellitare e le caratteristiche principali delle immagini radar. Un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incide sugli oggetti presenti al suolo subendo un fenomeno di riflessione disordinata. Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, che è equipaggiata anche per la ricezione, dove vengono misurate le sue caratteristiche. In particolare, le grandezze misurate sono l'ampiezza del segnale, che individua la quantità di campo elettromagnetico retrodiffusa verso il satellite (luminosità dell'oggetto) e la fase, che risulta strettamente legata alla distanza sensore-bersaglio e che, nelle applicazioni interferometriche, permette di identificare le aree soggette a deformazioni superficiali.

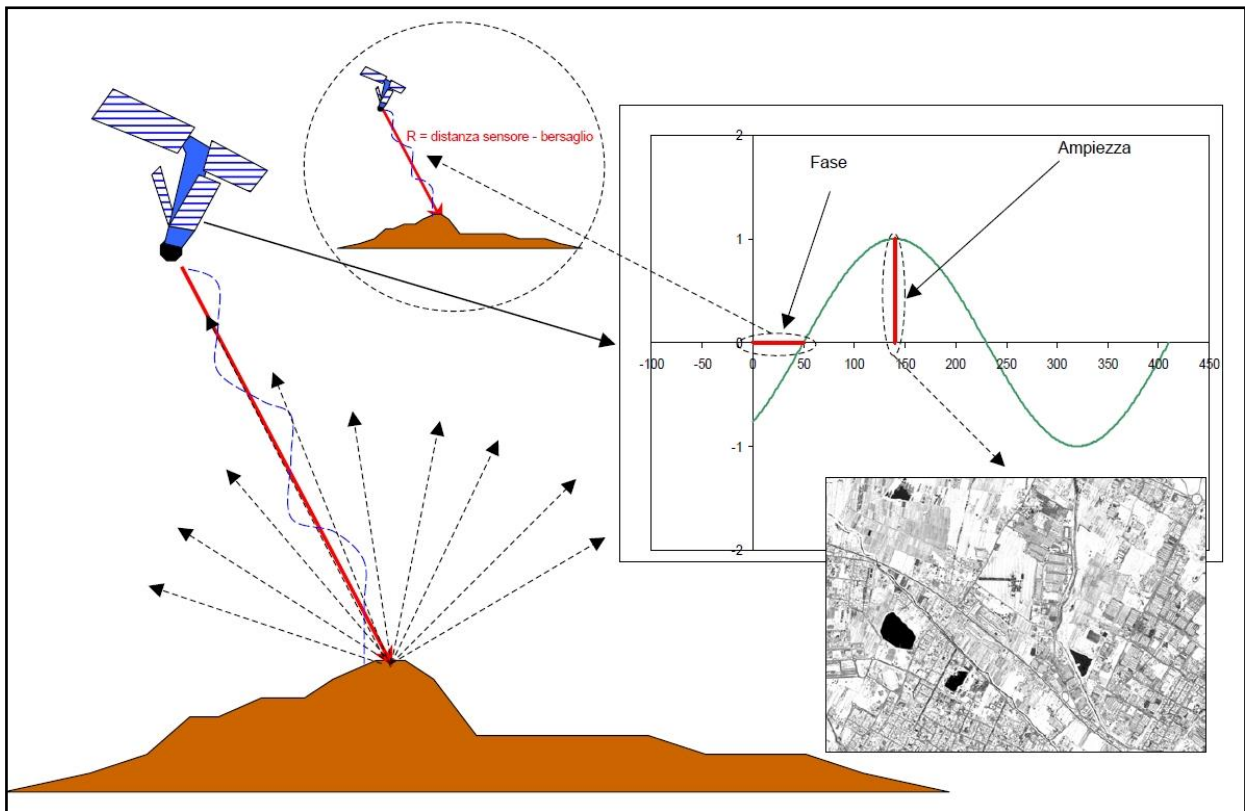


Figura 3 – Sistema di acquisizione radar satellitare e contributi di ampiezza e fase delle immagini radar

I termini che contribuiscono alla fase di una singola immagine radar dipendono fondamentalmente dalla riflettività del bersaglio, dalla distanza sensore-bersaglio e dallo stato fisico-chimico dell'atmosfera terrestre attraversata, oltre ovviamente dall'inevitabile rumore proprio del sistema di acquisizione.

La fase di una singola immagine risulta quindi inutilizzabile perché è di fatto impossibile discriminare un contributo dall'altro. Se invece effettuiamo una sottrazione tra i valori di fase di due immagini acquisite sulla

stessa scena in momenti diversi, ovvero generiamo un interferogramma, i contributi dovuti alla riflettività si elidono e la differenza di fase dipende, con buona approssimazione, solamente da eventuali movimenti intercorsi tra le due acquisizioni, a parte ovviamente i contributi dovuti all'atmosfera e al rumore, che possono però essere stimati utilizzando opportuni modelli matematici. In questo modo, sapendo lo spostamento avvenuto in una certa area e l'intervallo temporale intercorso, possiamo stimare la velocità di deformazione media durante le due acquisizioni.

L'applicazione dell'interferometria tradizionale a due immagini radar acquisite in tempi diversi (DSInSAR) presenta però molti inconvenienti, dovuti principalmente alla variabilità delle proprietà elettromagnetiche dei bersagli radar nel tempo (decorrelazione temporale), alla distanza tra le due orbite effettivamente percorse dal satellite (decorrelazione geometrica) ed alla variazione delle caratteristiche elettromagnetiche dell'atmosfera terrestre durante le due acquisizioni. Tutte queste problematiche fanno sì che l'interferometria radar da piattaforma satellitare tradizionale permetta unicamente di effettuare stime d'insieme per identificare fenomeni macroscopici in atto con accuratezza dell'ordine del centimetro.

In Figura 4 ad esempio è riportato un'interferogramma relativo alla zona dell'Aquila generato a partire da due immagini ENVISAT acquisite a febbraio e aprile 2009, quindi a cavallo del terremoto del 6 aprile. L'interferogramma mostra nove frange concentriche che individuano l'area di massimo spostamento tra L'Aquila e Fossa, dove il terreno si è spostato di circa 25 cm lungo la direzione di vista del satellite.

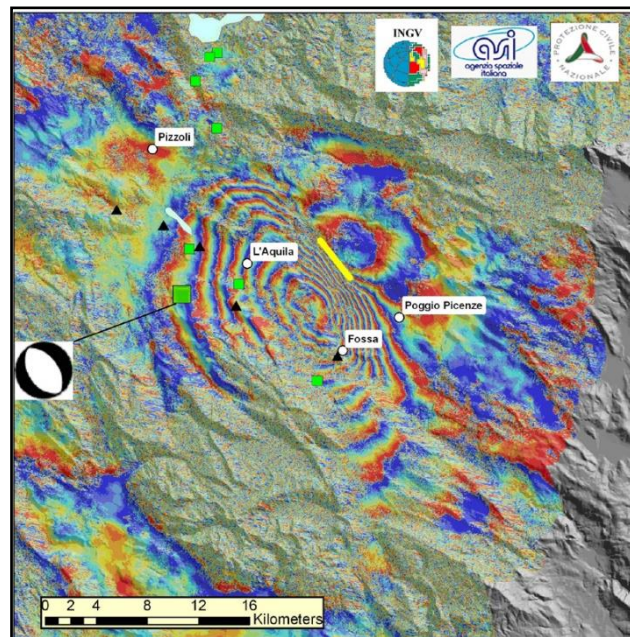


Figura 4 – Esempio di interferogramma ottenuto da elaborazione DInSAR

2.2. Tecniche interferometriche avanzate

Un'evoluzione dell'analisi interferometrica differenziale per lo studio delle deformazioni superficiali è invece costituita dalle tecniche interferometriche avanzate sviluppate a partire dagli anni '90. Queste tecniche permettono infatti di contenere i fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica e stimare i contributi di fase legati ai cambiamenti subiti dall'atmosfera tra le diverse acquisizioni, permettendo di raggiungere precisioni dell'ordine del mm, anziché del cm.

2.2.1. Generalità

Le tecniche interferometriche avanzate utilizzate nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PSTA) per l'elaborazione delle immagini acquisite dai satelliti ERS (1992-2000), ENVISAT (2003-2010) e Cosmo-SkyMED (2011-2014), sono quelle dei "Permanent Scatterers" (PSInSAR e SqueeSAR), messa a punto dal Politecnico di Milano e commercializzata dalla società spin-off Telerilevamento Europa (TRE), e quella dei "Persistent Scatterers Pairs" (PSP-IFSAR), sviluppata da e-GEOS, società controllata da Telespazio e da ESA. In entrambe le tecniche l'analisi interferometrica non viene più effettuata su due sole immagini, ma su una serie storica costituita da almeno una trentina di immagini e gli effetti di decorrelazione temporale vengono eliminati selezionando solo i bersagli radar, corrispondenti a singoli pixel o piccoli gruppi di pixel tra loro strettamente connessi, che presentano una firma elettromagnetica particolarmente stabile durante tutto l'intervallo temporale di analisi (PS), ovvero non affetti da decorrelazione temporale. I contributi di fase legati ai fenomeni di decorrelazione geometrica e agli effetti atmosferici vengono invece stimati applicando particolari algoritmi, come nel caso della tecnica PS del Politecnico di Milano, oppure operando in modo differenziale tra coppie di PS vicini, come nel caso della tecnica PSP di e-GEOS.

Indipendentemente dagli algoritmi utilizzati per l'individuazione dei diversi contributi di fase, entrambe le tecniche di elaborazione consistono, in estrema sintesi, nel processare una serie multitemporale di immagini radar acquisite dal satellite sulla stessa scena, almeno una trentina, per poi estrarre un insieme consistente di punti georiferiti, caratterizzati da una forte coerenza del segnale durante tutto l'intervallo di tempo considerato, ai quali può essere associata sia la velocità media di spostamento in mm/anno lungo la linea di vista del satellite riferita a tutto l'intervallo di tempo esaminato, sia il loro spostamento relativo in mm registrato ad ogni data di acquisizione delle immagini considerate (Figura 5). Tutte le misure sono di tipo differenziale, ovvero riferite spazialmente a punti a terra (reference points) di coordinate note e supposti fermi in funzione delle loro caratteristiche geologiche o sulla base di misure dirette derivate da livellazione topografica o analisi GPS, e riferite temporalmente alla data di acquisizione della prima immagine.

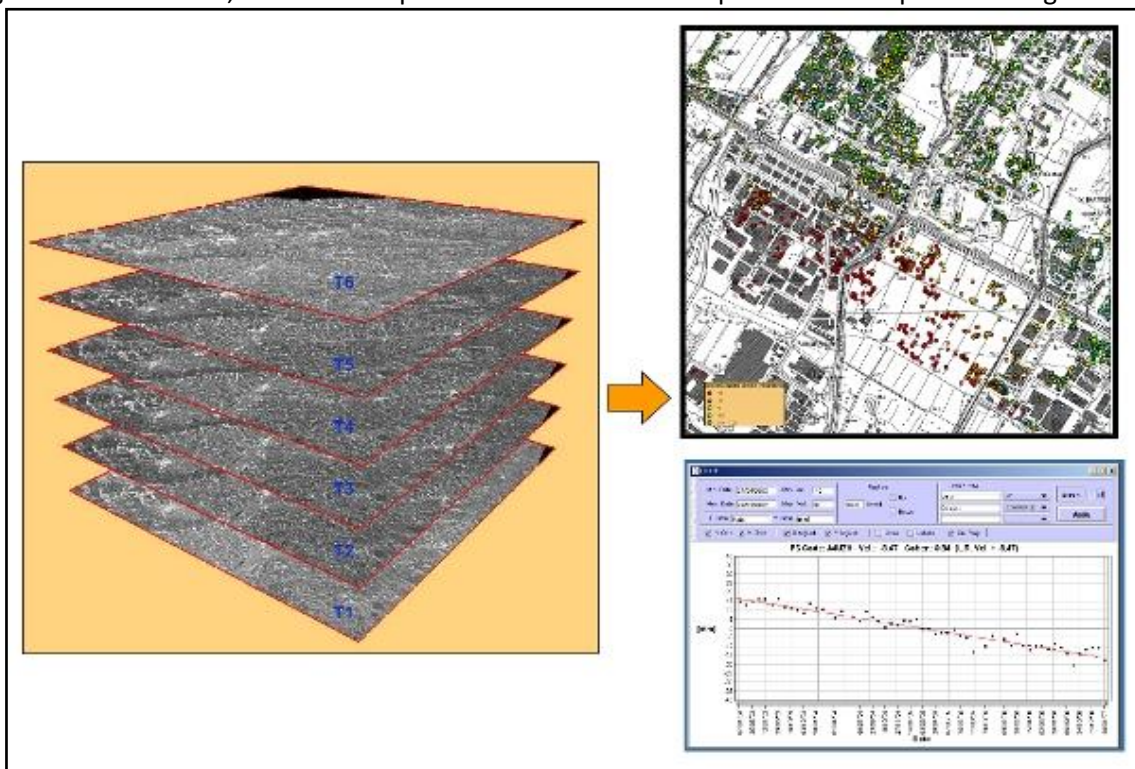


Figura 5 – Schematizzazione dei prodotti ottenibili tramite tecniche interferometriche avanzate

Questi punti, denominati Permanent scatterers o Persistent scatterers (PS), altro non sono che bersagli radar naturali già esistenti sul territorio, caratterizzati dall'aver una risposta al segnale radar particolarmente stabile durante tutto il periodo di analisi, corrispondenti generalmente ad edifici, rocce esposte, strutture metalliche, condotte di vario tipo, viadotti, reti elettriche, monumenti, cioè oggetti contraddistinti da un

elevato potere riflettente nei confronti della radiazione elettromagnetica emessa dal satellite. Questa caratteristica fa sì che la densità dei PS sia più che soddisfacente nelle aree urbanizzate (fino a qualche centinaio per kmq), ma si riduca notevolmente fino ad annullarsi in aree vegetate o periodicamente innevate. Per limitare questo inconveniente, nel 2011 TRE ha sviluppato un nuovo algoritmo per l'elaborazione dei dati interferometrici, denominato SqueeSAR (Ferretti et al., 2011), che rappresenta una evoluzione della tecnica PS e permette di ottenere una maggiore densità spaziale dei punti di misura anche in aree dove il segnale radar non presenta le caratteristiche di coerenza necessarie all'individuazione dei PS. Con questa tecnica vengono infatti individuate due famiglie di riflettori, ovvero i PS, le cui caratteristiche sono quelle viste in precedenza, e i DS (Distributed Scatterers), i quali non hanno una natura puntiforme ma rappresentano un gruppo di pixel adiacenti che però generano, nel loro insieme, identiche caratteristiche del segnale radar riflesso, generalmente riferibili ad aree coltivate o detritiche. Questa tecnica è utilizzata per l'elaborazione interferometrica delle immagini radar acquisite dal satellite SENTINEL-1 nel Programma di monitoraggio radar satellitare della Regione Toscana trattato al paragrafo 3.2, oltre che per l'elaborazione di alcune immagini radar acquisite dalla costellazione COSMO Sky-Med per il Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale trattato al paragrafo 3.1.

2.2.2. Principali limiti applicativi

I limiti principali di queste tecniche di elaborazione dell'informazione interferometrica sono invece legati alla particolare geometria di acquisizione delle immagini, alla natura delle onde elettromagnetiche utilizzate e alle caratteristiche dei PS. Per quanto riguarda il primo aspetto, dobbiamo infatti tenere presente che gli spostamenti vengono registrati lungo la linea di vista del satellite (LOS), che risulta essere orientata circa in direzione EO. Mentre tale geometria di acquisizione non comporta particolari problemi nell'analisi di movimenti prevalentemente verticali, tipo fenomeni di subsidenza del terreno, nello studio dei dissesti franosi, dove la componente orizzontale può assumere un carattere predominante, accade che più la direzione del movimento si discosta dalla direzione EO e più la velocità di spostamento viene sottostimata, fino ad arrivare alla situazione estrema di un movimento orizzontale con direzione NS che non viene assolutamente rilevato dal satellite.

L'altro limite della tecnica interferometrica è invece dovuto al fatto che se la differenza di cammino ottico tra due successive acquisizioni risulta essere maggiore o uguale alla lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica utilizzata, o ad un suo multiplo, nel generale l'interferogramma si perde il contributo intero della fase e lo spostamento viene sottostimato. Questo fenomeno, denominato "equivocazione di fase", fa sì che tra due successive acquisizioni sia possibile esaminare in modo soddisfacente solamente movimenti relativamente lenti che, considerate le lunghezze d'onda generalmente utilizzate, risultano caratterizzati da velocità medie di spostamento in direzione LOS minori di 5-6 cm/anno e spostamenti relativi tra due acquisizioni minori di 1 cm (per ERS ed ENVISAT). Nel caso di fenomeni franosi risultano quindi monitorabili in modo efficace fenomeni di scivolamento e colamento lento, mentre fenomeni di crollo-ribaltamento o colate rapide non possono essere esaminati in maniera soddisfacente. Viste le basse velocità di movimento risultano inoltre ben rilevabili fenomeni di subsidenza e segni precursori di sprofondamenti catastrofici tipo Sinkholes.

Infine, considerata la natura dei PS e la geometria di acquisizione dei satelliti, tale tecnica risulta limitata dall'assenza di misure in aree totalmente vegetate o non visibili dal satellite a causa di deformazioni prospettiche legate alla topografia del terreno.

3. Distribuzione spaziale e temporale dei prodotti interferometrici PSInSAR

Grazie alla disponibilità di grandi archivi di dati acquisiti dalle agenzie spaziali, le tecniche interferometriche avanzate permettono di ottenere migliori risultati di quelli ricavabili con analisi interferometriche

convenzionali, sia per la qualità delle misure di deformazione ottenute (precisione millimetrica), sia per la capacità di seguire l'evoluzione temporale degli spostamenti su un periodo molto esteso.

In Figura 6 vengono riportati i periodi di acquisizione dei principali sistemi radar satellitari, da cui possiamo vedere che esiste una copertura storica delle immagini utilizzabili per elaborazioni interferometriche a partire dagli anni '90.

Nell'ambito di questo lavoro verranno considerati solamente i satelliti dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) per cui sono già state effettuate e rese disponibili liberamente le elaborazioni PS sul territorio nazionale, con particolare riferimento ai prodotti elaborati nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (satelliti ERS, ENVISAT e COSMO Sky-Med), trattato al successivo paragrafo 3.1, e nell'ambito del Programma di monitoraggio radar satellitare della Regione Toscana (satellite SENTINEL-1), trattato al successivo paragrafo 3.2. Verrà inoltre considerato il satellite RADARSAT-1 dell'Agenzia Spaziale Canadese, in quanto utilizzato per il bacino dell'Arno relativamente al periodo di acquisizione 2003-2007.

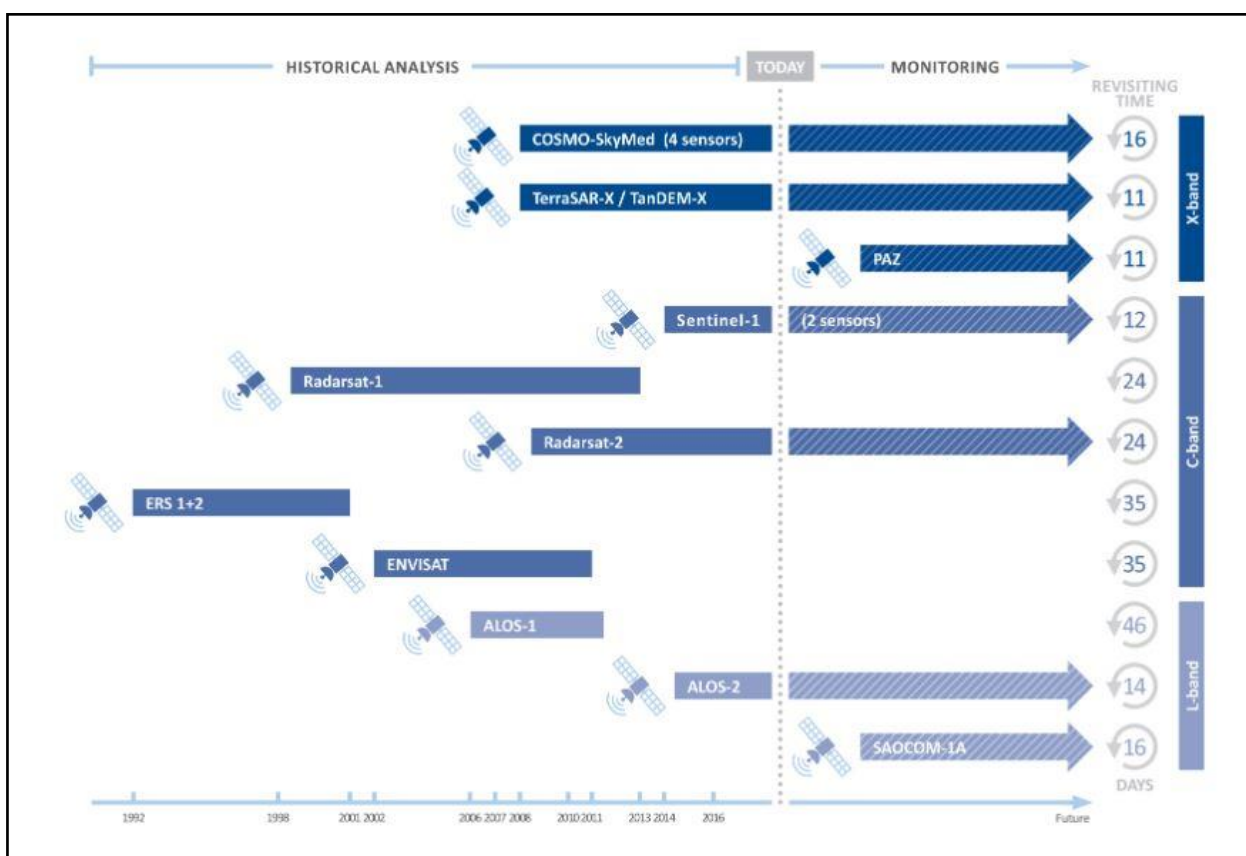


Figura 6 (da TRE) – presente, passato e futuro delle acquisizioni radar satellitari

Relativamente a questi satelliti, in Tabella 1 vengono riportati i valori angolari medi che ne definiscono la geometria di acquisizione, ottenuti dalle coperture spaziali dei dataset PS ricadenti nel territorio del Distretto Appennino Settentrionale e dedotti dalle coordinate del versore di puntamento (LOS) definite nei metadati di ogni cluster PS.

Tabella 1 – Valori medi dei parametri di azimuth e off-nadir per alcuni sistemi SA satellitari relativamente al Distretto Appennino Settentrionale

satellite	azimut	off-nadir
ERS	+/- 11°	+/- 23°
ENVISAT	+/- 13°	+/- 22°

RADARSAT-1	+/- 11°	+/- 32°
COSMO-SM	+/- 10°	+/- 34°
SENTINEL-1	+/- 10°	+/- 38°

Per verificare l'applicabilità delle tecniche interferometriche avanzate all'analisi delle problematiche ambientali sono stati realizzati diversi progetti, sia a livello nazionale che europeo, che hanno evidenziato la qualità e consistenza dei dati interferometrici, dimostrando che tali tecniche costituiscono sicuramente un valido supporto a metodi di monitoraggio tradizionali nello studio dei fenomeni franosi, quali GPS e livellazione topografica, e ne costituiscono in molti casi una valida alternativa. L'Autorità di Bacino del fiume Arno ha partecipato, in particolare, al progetto SLAM (Service for Landslide Monitoring) finanziato dall'ESA, dove è stata testata sia un'applicazione a livello di bacino idrografico dei dati interferometrici registrati dai satelliti ERS1 e ERS2 nel periodo 1992-2000 per il supporto alla realizzazione di una carta inventario dei fenomeni franosi, sia l'utilizzo delle serie storiche di spostamento registrate mensilmente dai satelliti per effettuare un monitoraggio dell'evoluzione dei dissesti.

3.1. Il Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PSTA)

Le forti potenzialità dell'interferometria radar satellitare ha portato il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ad effettuare un consistente investimento in queste tecnologie, inserendo nel "Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale" (PST-A), istituito ai sensi dell'art. 27 della legge 179 del 31 luglio 2002, anche l'elaborazione interferometrica delle immagini radar acquisite su tutta Italia dai satelliti ERS1 e ERS2 nel periodo 1992-2000 e dal satellite ENVISAT nel periodo 2003-2010, oltre all'elaborazione di alcune immagini acquisite dal sistema satellitare COSMO Sky-Med nel periodo 2011-2014.

I satelliti ERS ed ENVISAT hanno acquisito immagini radar in banda C, con frequenza pari a 5.3 GHz e, conseguentemente, lunghezza d'onda uguale a 5.66 cm. Le orbite sono eliosincrone, leggermente inclinate rispetto ai meridiani, la LOS risulta perpendicolare alla traiettoria del satellite e inclinata mediamente di un angolo di circa 23° (off-nadir) rispetto alla verticale. Il periodo di rivisitazione è di 35 giorni. Lo spostamento massimo rilevabile tra due acquisizioni è circa 1 cm, mentre la velocità media misurabile è di circa 5-6 cm/anno.

La costellazione COSMO-SkyMed è costituita da quattro satelliti che acquisiscono immagini in banda X, con frequenza compresa tra 8 e 12.5 GHz e quindi lunghezza d'onda tra 3.75 e 2.4 cm. Il tempo di rivisitazione è di 16 giorni, anche se l'uso combinato dei quattro satelliti può permettere di ottenere una frequenza di rivisitazione più elevata.

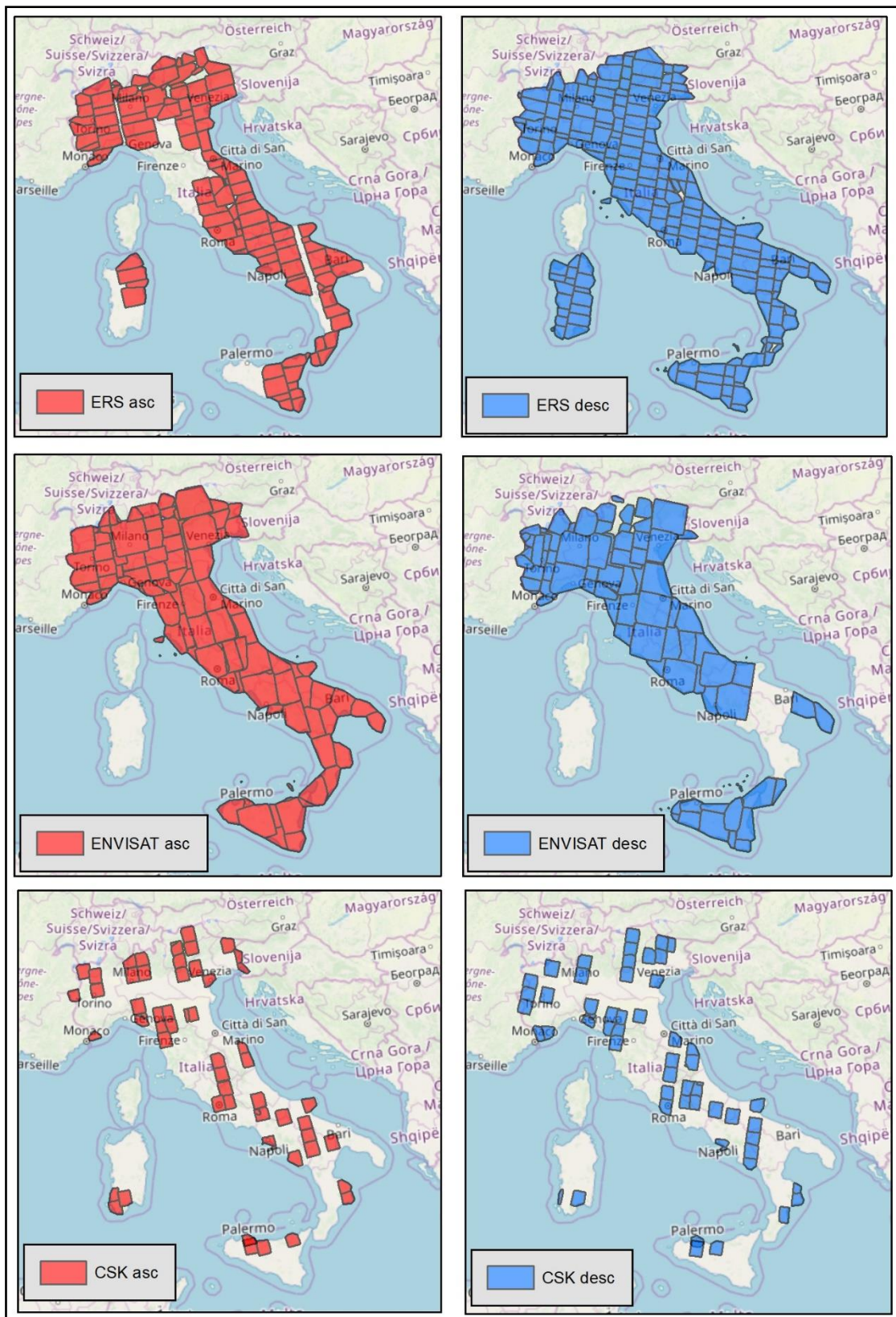


Figura 7 – Copertura nazionale delle elaborazioni PS effettuate nell'ambito del PST-A

Le immagini acquisite in banda X possiedono maggiori difficoltà di acquisizione in aree vegetate rispetto alla banda C a causa della minore lunghezza d'onda. Peraltro, tali sistemi permettono di ottenere una maggiore precisione nella stima delle deformazioni e sono progettati in modo da avere un tempo di rivisitazione più

ridotto, diminuendo quindi i fenomeni di decorrelazione temporale. Inoltre, la minore lunghezza d'onda accentua anche i problemi legati all'equivocazione di fase visti al paragrafo 2.2.2, anche se il minore tempo di rivisitazione limita in parte questo inconveniente.

In Figura 7 viene riportata la copertura nazionale delle elaborazioni PS effettuate nell'ambito del PST-A relativamente ai tre satelliti di riferimento.

I valori di velocità media nei periodi di riferimento dei tre satelliti, opportunamente classificati, sono forniti come servizi WMS del Geoportale Nazionale, mentre le coperture a livello nazionale dei rispettivi dataset sono disponibili come servizi WFS. I dataset puntuali dei singoli PS, riportanti sia velocità medie che serie storiche degli spostamenti, possono essere infine richiesti in formato vettoriale tramite il Geoportale Nazionale.

La disponibilità di questi dati a scala nazionale fornisce sicuramente un valido strumento di supporto alla identificazione e monitoraggio delle aree ad elevato rischio idrogeologico, utilizzabile sia dalle Pubbliche Amministrazioni che da professionisti.

Per i tre satelliti considerati, il database nazionale del Ministero con i dati PS contiene le seguenti informazioni:

CODE: codice identificativo del punto di misura;

VEL: velocità media del PS lungo la LOS espressa in mm/anno e riferita all'intero periodo di acquisizione considerato e valutata rispetto al reference point;

V_STDEV: valore di deviazione standard della velocità, che indica di quanto la stima della velocità vibra rispetto al punto di riferimento;

COHERENCE: indice che misura l'accordo tra i dati e il modello di spostamento utilizzato in fase di analisi; è variabile tra 0 (nessun accordo con il modello) e 1 (elevato accordo con il modello);

V_aaaa; velocità media del PS nell'anno indicato (aaaa) espressa in mm/anno e valutata rispetto al reference point.

VSTD_aaaa: deviazione standard della velocità del PS nell'anno considerato (aaaa);

D_aaaammgg: riporta il valore di spostamento relativo del PS (mm) rispetto alla prima immagine per ogni data di acquisizione considerata, espressa in anno (aaaa), mese (mm), giorno (gg).

3.2. Il Programma di monitoraggio radar satellitare della Regione Toscana

Nell'ambito dell'accordo stipulato, ai sensi dell'art. 15 della legge 7 agosto 1990, n. 241, e dell'art. 6 della legge 24 febbraio 1992, n. 225, con il Dipartimento della Protezione civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri e la Regione Toscana, il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze sta effettuando un monitoraggio in continuo delle deformazioni del terreno del territorio regionale toscano tramite interferometria radar satellitare.

Le immagini radar utilizzate in questo programma sono quelle acquisite dalla costellazione di satelliti SENTINEL-1 a partire dall'ottobre 2014 sull'intero territorio regionale e sono state elaborate secondo la tecnica SqueeSAR vista al paragrafo 2.2.1.

La costellazione SENTINEL-1 opera in banda C, con frequenza pari a 5.4 GHz e conseguentemente lunghezza d'onda uguale a 5.6 cm. Il tempo di rivisitazione è di 6-12 giorni.

Poiché per evitare equivocazioni di fase è necessario che lo spostamento massimo tra due successive acquisizioni non sia superiore ad un quarto della lunghezza d'onda, ne consegue che il massimo spostamento

rilevabile tra due successive acquisizioni risulta essere di circa 1.4 cm, mentre la massima velocità media misurabile risulta di circa 80 mm/anno.

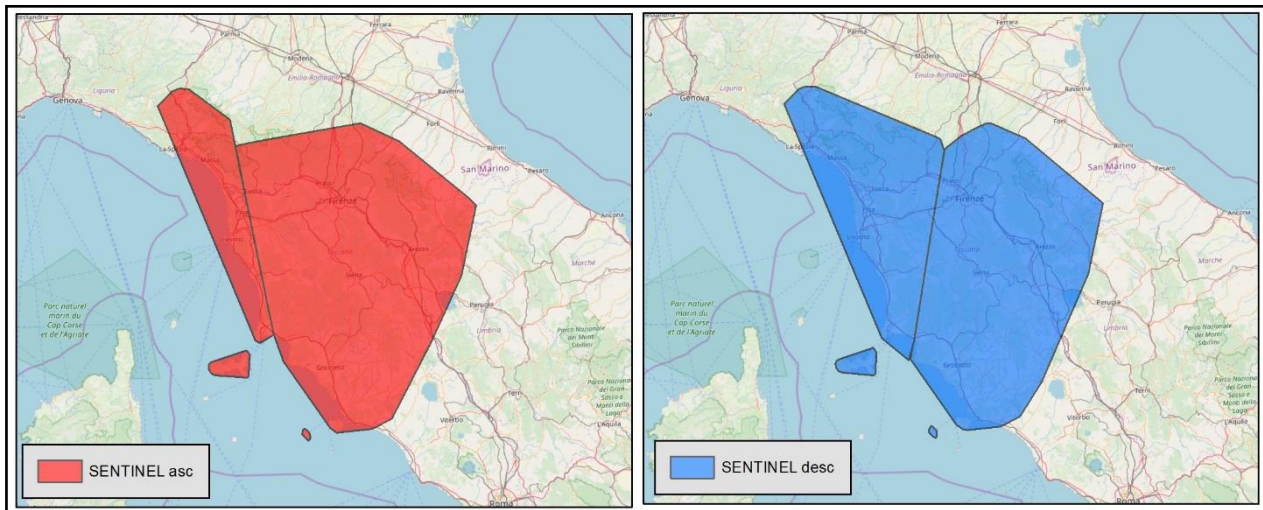


Figura 8 - Copertura regionale delle elaborazioni SqueeSAR effettuate nell'ambito del programma di Monitoraggio radar satellitare della Regione Toscana

In Figura 8 viene riportata la copertura regionale delle elaborazioni PSInSAR effettuate nell'ambito del Piano di monitoraggio radar satellitare della Regione Toscana relativamente ai satelliti SENTINEL-1. Il database della Regione Toscana con i dati PS contiene, in particolare, le seguenti informazioni:

CODE: codice identificativo del punto di misura;

HEIGHT: quota del punto estratta dal modello digitale del terreno utilizzato per l'elaborazione delle immagini radar;

EFF_AREA: nel caso di PS tale valore è uguale a zero, mentre nel caso di DS corrisponde alla superficie, espressa in mq, a cui tale punto si riferisce;

VEL: velocità media del PS lungo la LOS espressa in mm/anno e riferita all'intero periodo di acquisizione considerato e valutata rispetto al reference point;

V_STDEV: valore di deviazione standard della velocità, che indica di quanto la stima della velocità vibra rispetto al punto di riferimento;

H_STDEV: stima dell'errore, espresso in m, nella definizione della quota del punto considerato;

COHERENCE: indice che misura l'accordo tra i dati e il modello di spostamento utilizzato in fase di analisi; è variabile tra 0 (nessun accordo con il modello) e 1 (elevato accordo con il modello);

V_aaaa; velocità media del PS nell'anno indicato (aaaa) espressa in mm/anno e valutata rispetto al reference point.

VSTD_aaaa: deviazione standard della velocità del PS nell'anno considerato (aaaa);

D_aaaammgg: riporta il valore di spostamento relativo del PS (mm) rispetto alla prima immagine per ogni data di acquisizione considerata, espressa in anno (aaaa), mese (mm), giorno (gg).

I dataset ascendenti e discendenti con copertura regionale possono essere scaricati liberamente insieme ad una breve guida illustrativa che permette di comprenderne meglio il significato e i principali limiti applicativi

della tecnica interferometrica utilizzata. E' Inoltre disponibile un progetto webgis che permette la visualizzazione diretta dei valori di velocità media annua dei PS-DS con possibilità di esaminare le serie storiche degli spostamenti e di effettuare analisi di massima a scala locale e regionale.

4. Utilizzo ed elaborazione dei dati interferometrici PsInSAR

4.1. Introduzione

Come accennato al paragrafo 2.2.1, i valori di posizione, spostamento e velocità media attribuiti ai singoli PS vengono stimati attraverso elaborazioni statistiche rispetto ad un punto di riferimento supposto stabile. A tali valori può quindi essere associato un errore (deviazione standard) che ci indica di quanto vibra la stima del parametro considerato rispetto al punto di riferimento stesso. La deviazione standard dipende dalla distanza da punto di riferimento, tendendo ad aumentare allontanandosi da esso.

Nel caso della velocità media, il limite di sensibilità della tecnica interferometrica è stimabile in circa +/- 2 mm/anno, per cui i PS che presentano valori di velocità compresi in tale intervallo possono essere considerati stabili, ovvero non adeguatamente risolvibili con tale tecnica di analisi.

Dobbiamo inoltre tenere presente che la velocità media dei PS corrisponde al coefficiente angolare della retta di regressione lineare degli spostamenti registrati alle diverse date di acquisizione su tutto il periodo di analisi. Per tale motivo, risulta sempre molto utile verificare l'effettiva linearità della serie storica degli spostamenti in modo da valutare meglio l'affidabilità della stima. La struttura dei dati tra l'altro permette di assegnare agevolmente, tramite un qualsiasi foglio di calcolo, il valore del coefficiente di regressione lineare ad ogni PS individuato; tanto più tale coefficiente risulterà inferiore a uno e tanto maggiore sarà lo scostamento dal trend lineare. Oltre all'affidabilità del valore di velocità media assegnato, questa verifica permette anche di individuare agevolmente quei PS che presentano trend deformativi marcatamente non lineari, che potrebbero essere dovuti ad improvvise variazioni di velocità durante il periodo di analisi.

Come visto al paragrafo 1, la stima della velocità media di una certa area può essere effettuata, dove ovviamente le condizioni topografiche lo consentono, sia in modalità ascendente, ovvero osservando la scena da ovest verso est, sia in modalità discendente, ovvero osservando la scena da est verso ovest. I vettori velocità e spostamento relativo assegnati ai singoli PS nelle due geometrie sono orientati lungo la rispettiva linea di vista del satellite e possono trovarsi in condizione di allontanamento o avvicinamento rispetto ad esso. Quando si avvicinano, al modulo viene convenzionalmente assegnato segno positivo, mentre se si allontanano il segno è negativo.

L'esame congiunto delle due set di valori di velocità per una stessa area ci permette quindi di capire subito se la componente prevalente del movimento è verticale o orizzontale. Nel primo caso infatti, registreremo due set di valori di velocità media molto simili tra loro, sia come modulo che come verso, mentre nel caso di moto orizzontale i vettori avranno valore assoluto del modulo molto simile ma segno opposto.

Oltre all'esame congiunto dei dataset acquisiti nelle due geometrie risulta infine molto importante analizzare la distribuzione spaziale dei dati puntuali alla piccola/media scala, in modo da valutare meglio se i movimenti registrati sono da riferire al terreno d'imposta dei bersagli radar oppure alle loro caratteristiche strutturali.

Nei paragrafi che seguono vengono riportate alcune metodologie di analisi che possono essere utili per verificare gli elementi sopra esposti.

4.2. Valutazioni sugli spostamenti rilevati lungo la LOS

Come abbiamo visto, i valori di velocità registrati dai PS lungo la LOS sono solamente una componente della velocità reale in una determinata area. In generale, visto che la componente di velocità registrata dal satellite (Vasc o Vdesc) corrisponde alla proiezione della velocità reale (Vreale) lungo la LOS, risulta che la stima del valore di velocità varia come il coseno degli angoli A e B tra la LOS (discendente o ascendente) e direzione di puntamento del vettore (Vreale), come mostrato in Figura 9. Il coseno degli angoli A e B, essendo dato dal rapporto rispettivamente tra Vdesc o Vasc e Vreale, corrisponde infatti alla frazione di movimento reale che viene registrato nella rispettiva direzione di osservazione.

In generale, per verificare l'effettiva componente del movimento reale che viene registrata lungo le LOS ascendente e discendente, conviene esprimere l'orientamento del vettore spostamento reale in termini di "esposizione" e "inclinazione", come definiti di seguito, in modo poi da confrontarli direttamente con i corrispondenti parametri geometrici del versante analizzato nell'ipotesi di movimento lungo la linea di massima pendenza.

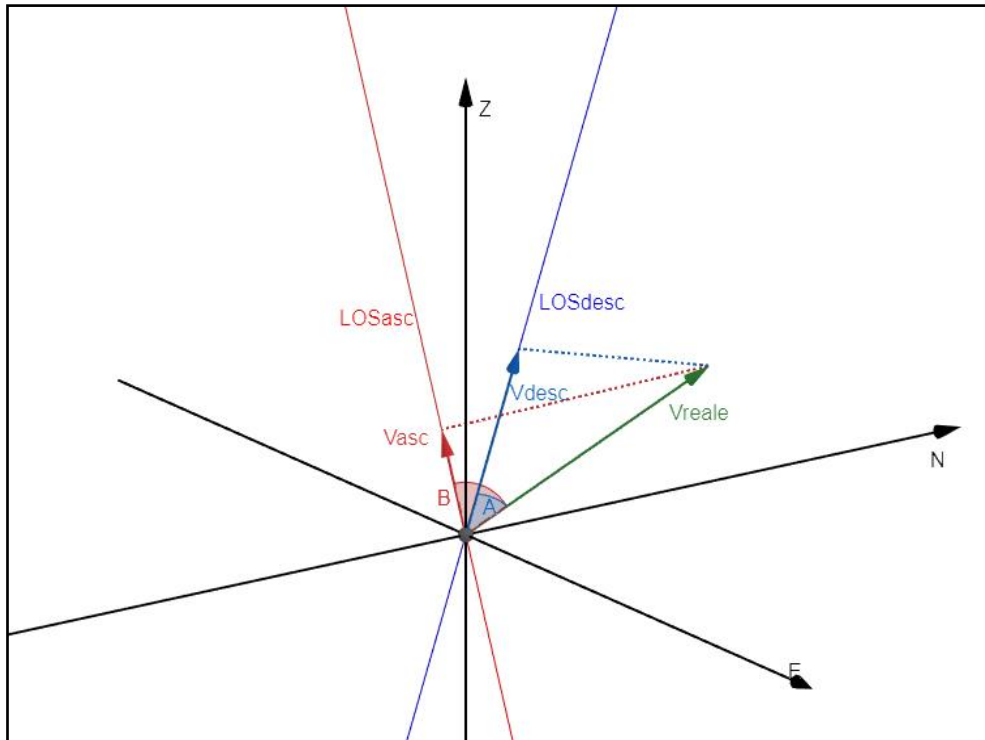


Figura 9 – Definizione degli angoli A e B tra vettore spostamento reale (V_{reale}) e LOS discendente e ascendente

Facciamo riferimento alla Figura 10, dove viene individuato l'angolo A tra la velocità reale (V_{reale}) e il corrispondente valore registrato lungo la LOS discendente (V_{desc}), ipotizzando che la traiettoria del satellite coincida con la direttrice N-S.

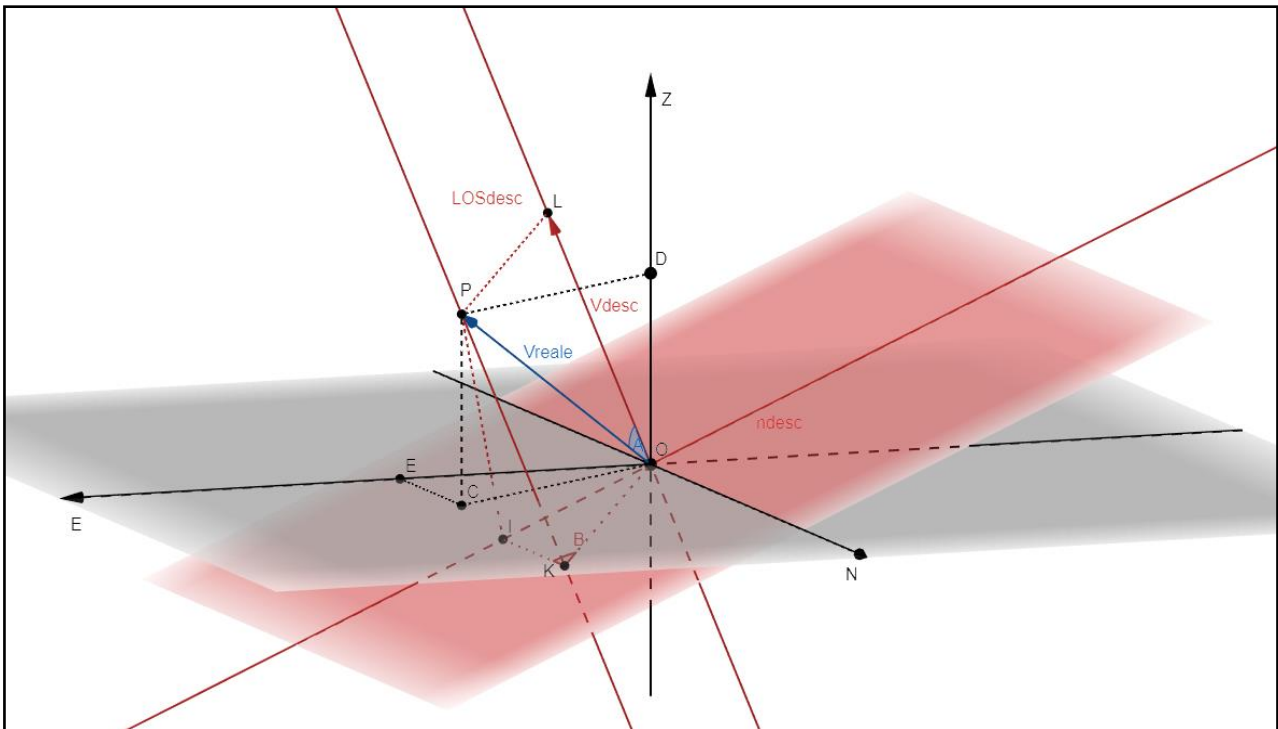


Figura 10 – Schematizzazione del rapporto tra sistema di riferimento geografico (E-N-Z) e sistema satellitare in geometria discendente (ndesc-N-LOSdesc)

In questa ricostruzione possiamo individuare due sistemi di riferimento, ruotati tra loro di un angolo V corrispondente all'inclinazione del satellite rispetto alla verticale.

Il primo sistema di riferimento, che si riferisce ai tre assi EST, NORD e ZENIT, ci permette di esprimere le coordinate del vettore V_{reale} in termini di esposizione (esp), ovvero angolo tra N e proiezione di V_{reale} sul piano orizzontale (OC), variabile tra 0° e 360° in senso orario partendo da N, ed inclinazione (inc), cioè l'angolo che V_{reale} forma con la sua proiezione sul piano orizzontale (OC), variabile tra 0° e $\pm 90^\circ$ a seconda che si trovi rispettivamente nel settore con Z positivo o in quello con Z negativo.

Rispetto al primo sistema di riferimento possiamo scrivere:

$$OC = OP \cdot \cos(inc)$$

$$e \text{ (coordinata est)} = OE = OC \cdot \sin(esp)$$

$$z \text{ (coordinata zenit)} = OP \cdot \sin(inc)$$

quindi:

$$e = OP \cdot \cos(inc) \cdot \sin(esp)$$

$$z = OP \cdot \sin(inc)$$

Il secondo sistema di riferimento, che si riferisce invece ai tre assi $ndesc$ (perpendicolare alla LOS desc), NORD e LOS desc, ci permette di esprimere le coordinate del vettore V_{reale} in funzione dell'angolo A definito precedentemente:

$$OK = OP \cdot \sin(A)$$

$$e1 \text{ (coordinata ndesc)} = OI = OK \cdot \sin(B)$$

$$z1 \text{ (coordinata LOS desc)} = OL = OP \cdot \cos(A)$$

quindi:

$$e1 = OP \cdot \sin(A) \cdot \sin(B)$$

$$z1 = OP \cdot \cos(A)$$

Applichiamo ora la formula di corrispondenza delle coordinate per la rotazione di un angolo V (negativo per ascendenti e positivo per discendenti) tra i due sistemi di riferimento, in modo da esprimere la coordinata $z1$ (sistema solidale con il satellite) in funzione delle coordinate $e-z$ (sistema orientato secondo i punti cardinali):

$$z1 = e \cdot \sin(V) + z \cdot \cos(V)$$

$$OP \cdot \cos(A) = OP \cdot \cos(inc) \cdot \sin(esp) \cdot \sin(V) + OP \cdot \sin(inc) \cdot \cos(V)$$

Da cui si ricava:

$$\cos(A) = \cos(\text{inc}) * \sin(\text{esp}) * \sin(V) + \sin(\text{inc}) * \cos(V)$$

Questa funzione è stata ottenuta ipotizzando una traiettoria del satellite coincidente con la direttrice N-S, ma può essere facilmente adattata alla traiettoria reale effettuando semplicemente una traslazione dei valori di esposizione coerentemente con l'angolo che essa forma con il nord. Quindi, indicando con H l'angolo che la traiettoria forma con il nord (negativo per ascendenti e positivo per discendenti) otteniamo:

$$\cos(A) = \cos(\text{inc}) * \sin(\text{esp}-H) * \sin(V) + \sin(\text{inc}) * \cos(V)$$

Le considerazioni svolte in riferimento alla Figura 7c portano ad ottenere valori positivi di $\cos(A)$, ovvero A minore di 90°, per inclinazioni con componente verticale verso lo zenit. Nel caso di movimenti franosi, dove la componente verticale è generalmente verso il nadir, si usa esprimere il coseno dell'angolo supplementare rispetto all'angolo A definito in Figura 10. Indicando tale angolo come C (=180-A) otteniamo:

$$\cos(C) = -\cos(\text{inc}) * \sin(\text{esp}-H) * \sin(V) - \sin(\text{inc}) * \cos(V)$$

In Figura 11 viene riportata la percentuale del valore di velocità reale registrato lungo le LOS ascendente e discendente dei satelliti ERS e SENTINEL-1 per alcuni valori d'inclinazione del vettore (Vreale) in funzione della sua esposizione, tenendo conto della traiettoria reale dei satelliti (+/- 10°N). In generale possiamo osservare che le percentuali di stima più alte si ottengono per elevati angoli d'inclinazione, visto che entrambi i satelliti hanno un angolo di off-nadir inferiore ai 45° (23° per ERS e 38° per SENTINEL-1). La minore inclinazione della LOS di SENTINEL-1 permette peraltro di risolvere meglio di ERS i moti suborizzontali, anche se la percentuale di stima rimane comunque relativamente bassa. Quando l'inclinazione del vettore (Vreale) è uguale a quella della LOS (67° per ERS e 52° per SENTINEL-1), la percentuale di stima raggiunge il 100% per valori di esposizione pari a 80° (90°-10°) in modalità ascendente e 280° (270°+10°) in modalità discendente, ovvero quando il vettore (Vreale) risulta parallelo alla LOS. Quanto infine l'inclinazione del vettore (Vreale) è uguale a 90°, la percentuale di stima rimane ovviamente costante indipendentemente dall'esposizione, risultando pari al 92% per il satellite ERS e al 79% per il satellite SENTINEL-1.

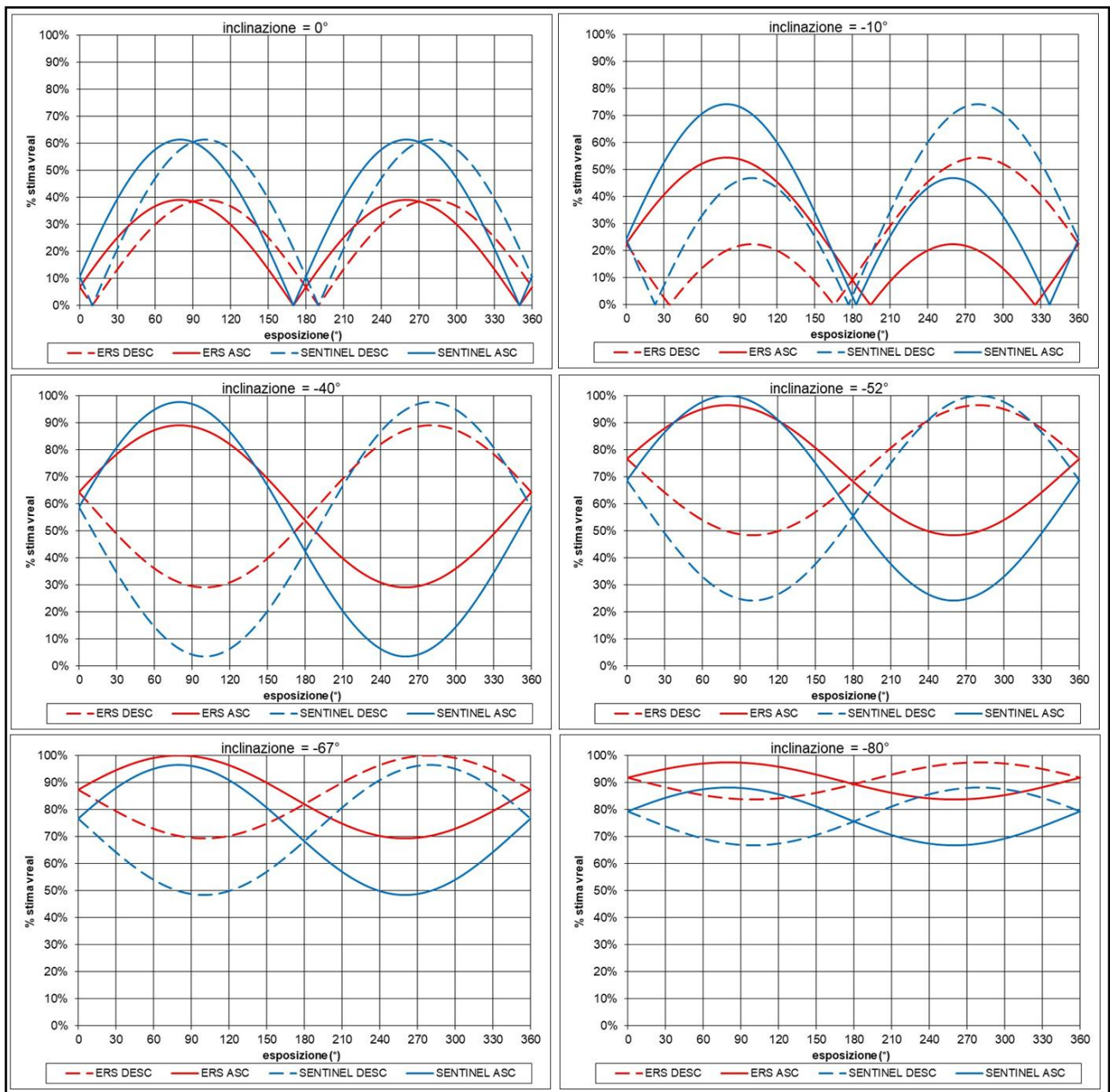


Figura 11 – percentuale di movimento reale registrato lungo le LOS ascendente e discendente (satelliti ERS e SENTINEL-1) per alcuni angoli di inclinazione in funzione dell'esposizione

4.3. Ricostruzione del vettore spostamento nel piano EOZN

Se assumiamo, per approssimazione, che la traiettoria del satellite coincida con la direttrice N-S per entrambe le geometrie di acquisizione, possiamo ricombinare agevolmente i due vettori velocità ascendente e discendente in modo da ottenere il vettore risultante nel piano Est-Ovest-Zenit-Nadir (EOZN). Tale vettore Infatti, dovrà avere modulo e verso tali da far sì che la sua proiezione lungo le due linee di osservazione del satellite, ascendente e discendente, restituisca i valori di velocità effettivamente registrati nelle due modalità di acquisizione.

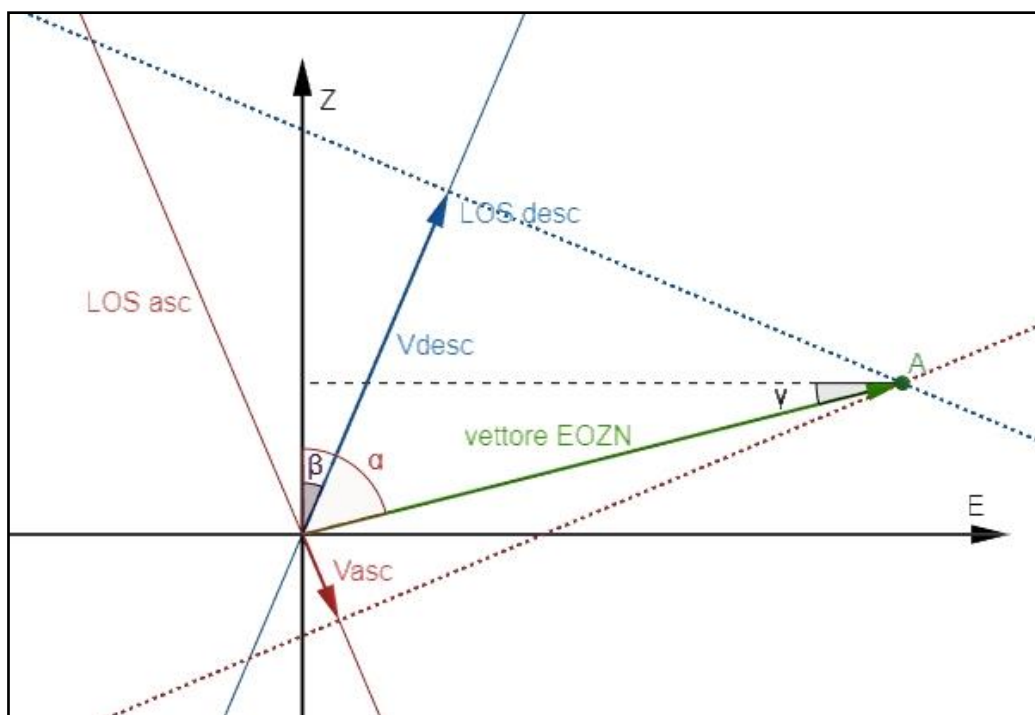


Figura 12 – Ricostruzione del vettore spostamento nel piano EOZN

Con riferimento alla Figura 12, il vettore EOZN avrà quindi inizio nell'origine del sistema di riferimento e terminerà nel punto d'intersezione tra le due rette perpendicolari alle LOS ascendente e discendente passanti rispettivamente per gli estremi dei vettori Vasc e Vdesc.

Se indichiamo con β l'angolo che le LOS ascendente e discendente formano con la verticale, possiamo scrivere le equazioni delle due rette come segue:

$$\text{Retta normale LOS ASC} : z = \tan(\beta) e + \frac{V_{asc}}{\cos(\beta)}$$

$$\text{Retta normale LOS desc} : z = -\tan(\beta) e + \frac{V_{desc}}{\cos(\beta)}$$

Per trovare le coordinate del punto A (e,z) effettuiamo l'intersezione:

$$\tan(\beta) e + \frac{V_{asc}}{\cos(\beta)} = -\tan(\beta) e + \frac{V_{desc}}{\cos(\beta)}$$

da cui si ricava:

$$e = \frac{V_{desc} - V_{asc}}{2 \sin(\beta)} \quad z = \frac{V_{desc} + V_{asc}}{2 \cos(\beta)}$$

tramite le due coordinate del punto A (e,z) possiamo quindi calcolare il modulo del vettore EOZN

$$|EOZN| = \sqrt{e^2 + z^2}$$

Per quanto riguarda il verso del vettore EOZN, risulta molto agevole esprimerlo come l'angolo (α) che esso forma con la direzione positiva dell'asse Z, variabile tra 0° e 360° . In questo modo se il vettore è orientato nel primo quadrante (Zenit-Est) l'angolo α risulterà variabile tra 0° e 90° , nel secondo quadrante (Nadir-Est) tra 90° e 180° , nel terzo quadrante (Nadir-Ovest) tra 180° e 270° e nel quarto quadrante (Zenit-Ovest) tra 270° e 360° . Per effettuare questa operazione è innanzi tutto necessario calcolare l'angolo (γ):

$$\gamma = \arctan\left(\frac{z}{e}\right)$$

A questo punto per ottenere l'angolo α come sopra definito dovremo confrontare tra loro i valori delle velocità ascendente e discendente registrate dal satellite ed effettuare la trasformazione da angolo γ ad angolo α come indicato nella seguente tabella:

Vasc	Vdesc	confronto	α	quadrante
≥ 0	≥ 0	Vasc > Vdesc	$270^\circ - \gamma$	IV (ZO)
		Vasc < Vdesc	$90^\circ - \gamma$	I (ZE)
< 0	< 0	Vasc > Vdesc	$270^\circ - \gamma$	III (NO)
		Vasc < Vdesc	$90^\circ - \gamma$	II (NE)
> 0	< 0	Vasc > -Vdesc	$270^\circ - \gamma$	IV (ZO)
		Vasc < -Vdesc	$270^\circ - \gamma$	III (NO)
< 0	> 0	Vasc > -Vdesc	$90^\circ - \gamma$	I (ZE)
		Vasc < -Vdesc	$90^\circ - \gamma$	II (NE)

Come possiamo osservare in Figura 13, nel caso di un moto puramente orizzontale risulterà che i valori di velocità registrati nelle due geometrie presenteranno lo stesso modulo ma segno opposto, mentre nel caso di moto puramente verticale i valori di velocità avranno sia lo stesso modulo che lo stesso segno, ovvero risulteranno entrambi negativi nel caso di sprofondamenti, oppure entrambi positivi nel caso di sollevamenti. In generale, se l'angolo α sarà compreso tra 45° e 135° oppure tra 225° e 315° , stiamo osservando un fenomeno caratterizzato da una principale componente orizzontale, rispettivamente verso est o verso ovest, come nel caso di movimenti franosi. Nei restanti intervalli angolari siamo invece in presenza di fenomeni con principale componente verticale, riconducibili in particolare a fenomeni di sollevamento, se l'angolo varia tra 0° e 45° oppure tra 315° e 360° , o a fenomeni di subsidenza, se l'angolo è compreso tra 135° e 225° . Visto che difficilmente i singoli PS avranno la stessa posizione nelle due geometrie ascendente e discendente, per ricostruire il vettore spostamento nel piano EOZN dobbiamo prima effettuare una generalizzazione dei valori di velocità in modo da rendere i dati dei due dataset tra loro confrontabili. A tal fine è utile considerare una griglia di ricampionamento con maglia quadrata e dimensioni adeguate alla distribuzione spaziale dei valori di velocità, per poi assegnare al centro di ogni cella il valore medio di velocità di tutti i PS che vi ricadono all'interno. Utilizzando la stessa griglia sia per il dataset ascendente che per quello discendente sarà poi possibile confrontare tra loro i risultati ottenuti per uno stesso punto ed effettuare le operazioni necessarie alla ricostruzione del vettore risultante.

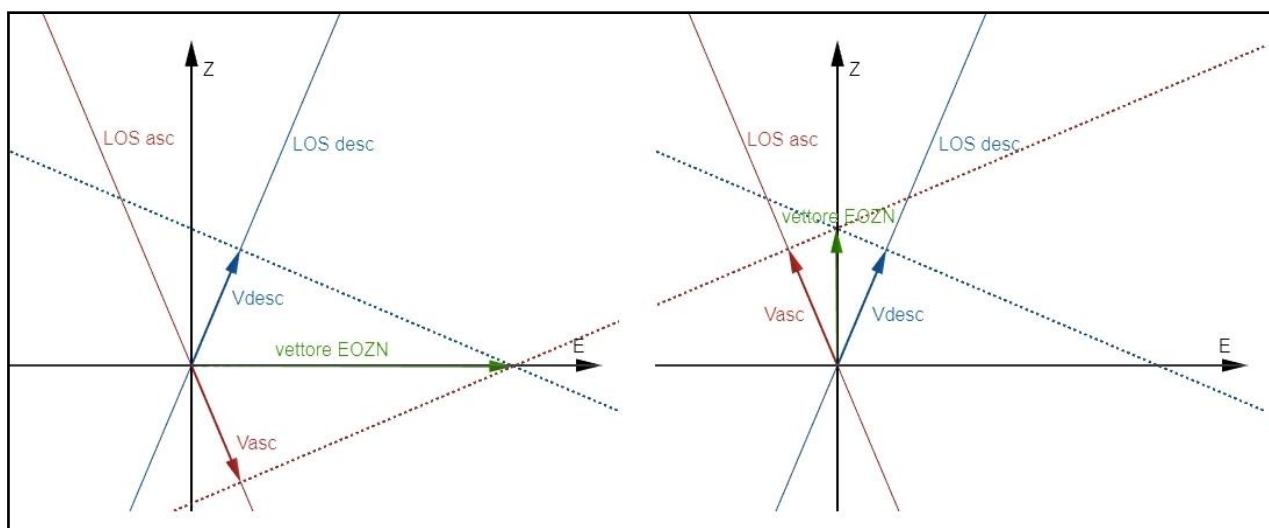


Figura 13 – Ricostruzione del vettore spostamento nel piano EOZN nel caso di moto puramente orizzontale (a sinistra) e puramente verticale (a destra)

Non sempre risulta possibile ricostruire il vettore EOZN, perché non è detto che le aree osservate vengano adeguatamente risolte nelle due geometrie di acquisizione, ma dove è possibile è sempre bene procedere a questa ricombinazione in modo da evitare una errata interpretazione del fenomeno osservato. Nel caso mostrato in Figura 12, ad esempio, se avessimo esaminato solamente il dato ascendente avremmo rilevato un fenomeno di abbassamento del terreno, mentre l'analisi congiunta delle due geometrie ha evidenziato un moto prevalentemente orizzontale con componente verticale in sollevamento.

La procedura di ricostruzione del vettore EOZN sopra descritta risulta comunque basata su un'approssimazione, considerato che in realtà le traiettorie dei satelliti si discostano sensibilmente dalla direzione N-S (Tabella 1), intersecandosi tra loro con un angolo di circa 20° nelle due modalità di acquisizione. Tale approssimazione peraltro, anche se non permette di effettuare analisi quantitative, ci consente comunque una valutazione qualitativa del fenomeno osservato, in modo da capire se si tratta di un moto prevalentemente verticale, come nel caso di un fenomeno di subsidenza del terreno, oppure se è presente anche un'importante componente orizzontale, come si verifica generalmente nell'analisi di un fenomeno franoso. Inoltre, nel caso di dissesti gravitativi di versante, l'esame congiunto dei valori di velocità rilevati nelle due geometrie ci permette di verificare la coerenza del movimento osservato con l'esposizione del versante, in modo da comprendere meglio la natura del fenomeno che stiamo analizzando.

4.4. Confronto tra velocità acquisite in periodi temporali diversi

In generale, i dati acquisiti con diversi sensori satellitari non possono essere integrati tra loro a causa delle diverse caratteristiche di acquisizione (polarizzazione, banda utilizzata, orientamento della LOS). Può comunque risultare utile effettuare dei confronti puramente qualitativi tra i trend di deformazione registrati da differenti satelliti su una stessa area, in modo da ottenere indicazioni di massima sullo stato di attività di un fenomeno in periodi temporali diversi.

Un esempio di questa tipologia di analisi è riportato in Figura 14, dove sono confrontati i valori assoluti di velocità media annua registrati dal satellite ERS nel periodo 1992-2000 con quelli registrati dai satelliti RADARSAT-1 nel periodo 2003-2006, ENVISAT nel periodo 2003-2010 e SENTINEL-1 a partire dal 2014. Tale confronto ci permette di costruire una matrice di attività dove è possibile discriminare tra lo stato inattivo stabilizzato, se risultano velocità inferiori ai 2 mm/anno per tutti i satelliti considerati, e lo stato attivo, dove invece almeno uno dei satelliti considerati mostra evidenti segni di movimento. In particolare, lo stato attivo può a sua volta essere ulteriormente suddiviso in "continuo", se tutti i satelliti registrano velocità superiori ai 2 mm/anno, "sospeso", dove soltanto i dati ERS mostrano velocità superiori ai 2 mm/anno e "riattivato", dove invece i dati ERS risultano stabili ma uno o più degli altri satelliti individuano aree con velocità superiori ai 2 mm/anno.

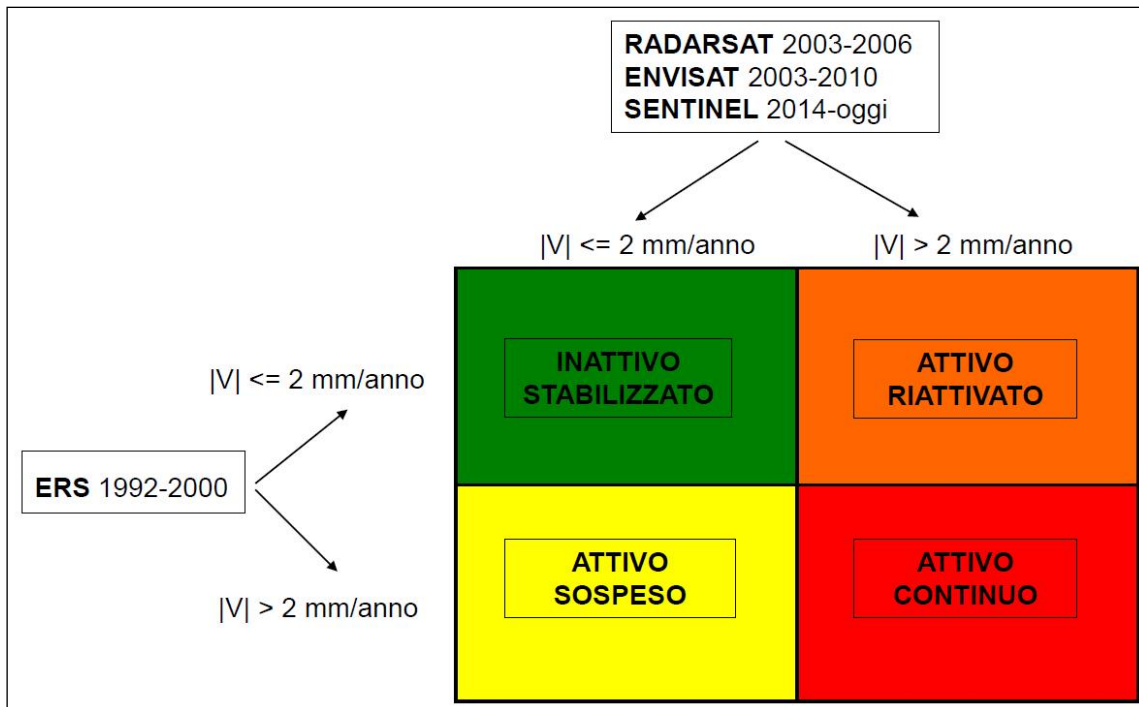


Figura 14 – Matrice dello stato di attività ottenuta dal confronto tra velocità dei PS registrate in diversi periodi temporali

Anche in questo caso sarà molto difficile che i singoli PS rilevati da satelliti diversi occupino la stessa posizione nello spazio, quindi per confrontarli tra loro sarà necessario effettuare un ricampionamento (media dei valori) su griglia comune, come già visto al paragrafo 4.3 per la ricostruzione del vettore spostamento nel piano EOZN. Utilizzando la stessa griglia per tutti i satelliti considerati sarà quindi possibile confrontare tra loro i risultati ottenuti per uno stesso punto ed applicare le considerazioni sullo stato di attività di Figura 14. In funzione della disponibilità dei dati sull'area in esame, il confronto potrà essere fatto sui singoli dataset ascendente e/o discendente dei diversi satelliti considerati oppure, ove possibile, direttamente sul vettore risultante nel piano EOZN.

Come detto precedentemente, questa informazione ha carattere puramente qualitativo ma può risultare particolarmente utile come supporto alla definizione dello stato di attività dei dissesti grafitativi di versante o per verificare eventuali variazioni di trend a grande scala nell'analisi dei fenomeni di subsidenza del terreno. Peraltro, come abbiamo visto nel paragrafo 4.3 e come più volte sottolineato nei successivi paragrafi, la definizione delle aree stabili appare molto problematica e necessita di ulteriori valutazioni oltre il puro esame dei valori di velocità rilevati dai PS, che potrebbero essere fortemente sottostimati in seguito alla posizione relativa del vettore spostamento reale rispetto alla LOS.

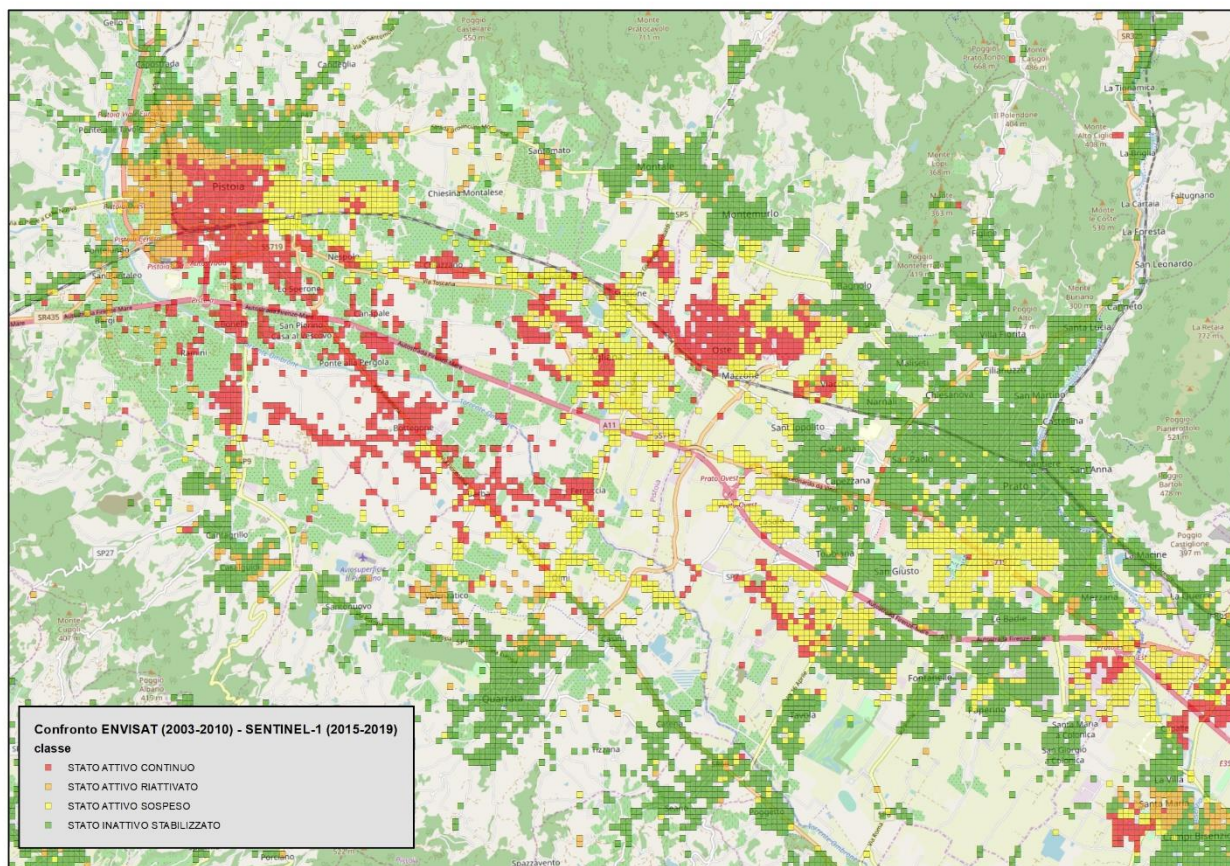


Figura 15 – Esempio di classificazione dello stato di attività per confronto tra elaborazioni ENVISAT (2003-2010) e SENTINEL-1 (2015-2019)

In Figura 15 è riportato un esempio di classificazione dello stato di attività in un'area della pianura Firenze-Prato-Pistoia utilizzando i criteri della matrice di Figura 14. In questo esempio, in particolare, sono stati confrontati i valori di velocità ottenuti dalla ricostruzione del vettore spostamento nel piano EOZN per il satellite ENVISAT relativamente al periodo 2003-2010 con quelli ottenuti per il satellite SENTINEL-1 relativamente al periodo 2015-2019.

4.5. Definizione delle aree ad alta densità di PS (HDPSA)

Spesso risulta molto difficile, se non tramite indagini di dettaglio e verifiche di campagna, capire se lo stato di deformazione dei PS evidenziato dall'analisi satellitare sia da mettere in relazione alla natura dell'elemento riflettente o ad un fenomeno di movimento generalizzato del terreno su cui tale elemento insiste. L'analisi della distribuzione delle velocità di spostamento dei PS permette peraltro di discriminare le aree dove i movimenti risultano omogeneamente distribuiti nello spazio, e quindi più facilmente riconducibili a deformazioni generalizzate del terreno, da quelle dove invece non è possibile individuare una tendenza prevalente della deformazione, con presenza di nuvole di PS a diverso comportamento. In quest'ultimo caso risulta più probabile che i valori anomali di deformazione siano da mettere in relazione alla natura dei bersagli radar (problemi strutturali, fenomeni di assestamento, etc.), piuttosto che alla presenza di deformazioni generalizzate del terreno (dissesti gravitativi, aree in subsidenza, etc.).

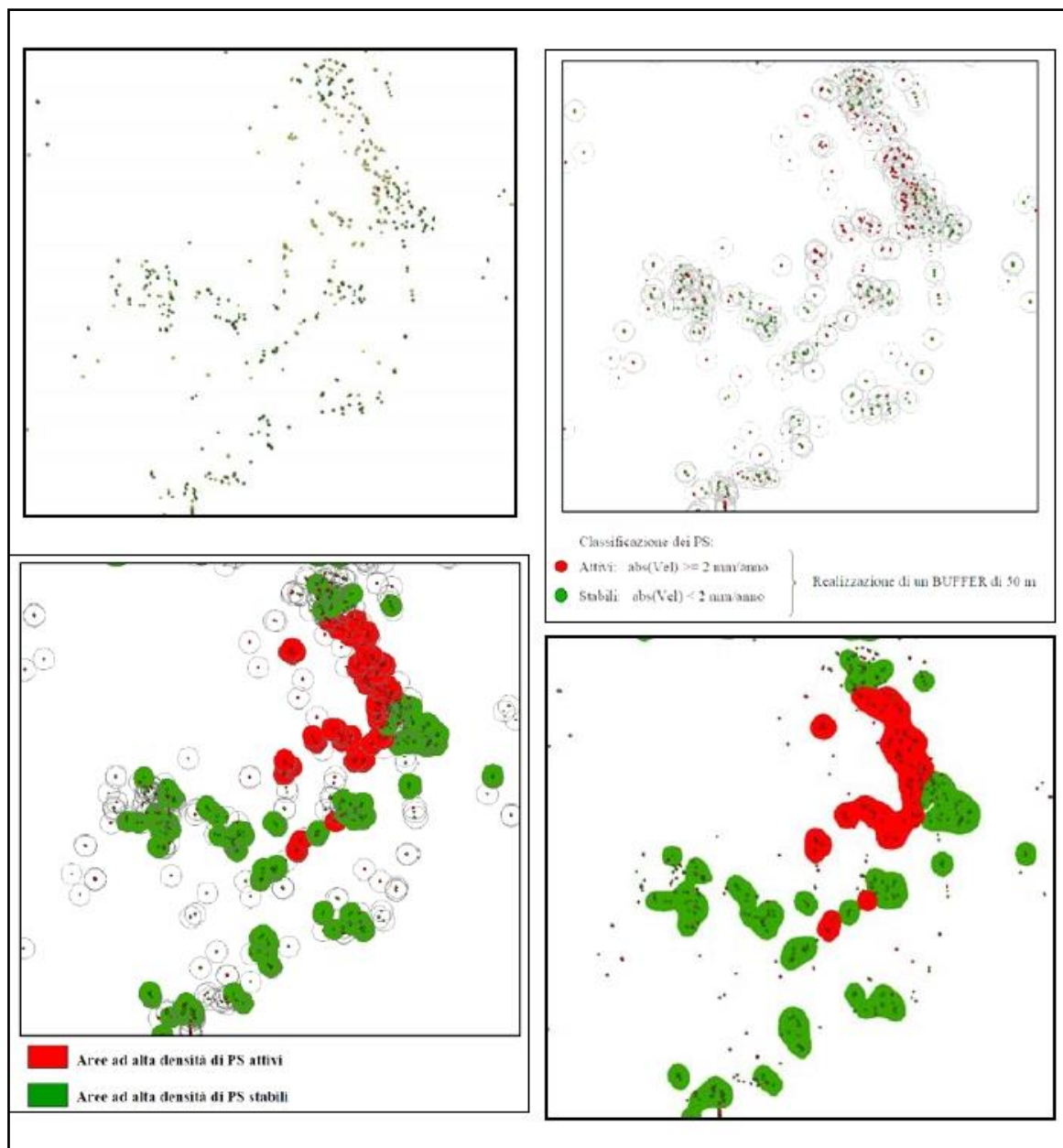


Figura 16 – Schema della procedura per l'individuazione delle aree ad alta densità di PS

Un possibile approccio per discriminare questo diverso comportamento nella distribuzione delle deformazioni e, in particolare, per delimitare le aree più probabilmente interessate da dissesti gravitativi, è riportato in Brugioni et al. (2011). In questo lavoro il dato PS è stato ricampionato tramite un criterio di densità spaziale che tiene conto sia della concentrazione che dello stato di attività dei bersagli radar considerati (Figura 16).

Inizialmente tutti i PS sono stati classificati come attivi o stabili a seconda che, rispettivamente, presentassero velocità medie annue superiori o inferiori all'errore strumentale ($\pm 2 \text{ mm/anno}$). Per ognuno di essi è stato quindi considerato l'intorno circolare con raggio di 50 m ed è stato determinato il numero di PS attivi e stabili che vi ricadevano all'interno. I buffers ottenuti sono stati quindi classificati come aree ad alta densità di PS (HDPSA) "attive" o "stabili" a seconda che presentassero una delle seguenti caratteristiche:

- punto centrale del buffer attivo e presenza di una percentuale di PS attivi superiore al 75% e comunque non inferiore a tre (HDPSA attive).
- punto centrale del buffer stabile e presenza di una percentuale di PS stabili superiore al 75% e comunque non inferiore a tre (HDPSA stabili).

I buffers così classificati sono stati estratti, rimodellati geometricamente per meglio approssimare la distribuzione dei PS, ed infine inseriti in un unico file imponendo la sovrapposizione dei buffers attivi su quelli stabili. Tale operazione è stata effettuata sia per il dataset ascendente che per quello discendente, per poi unire le due informazioni in un unico file e classificare i poligoni risultanti come riportato in Tabella 2.

Tabella 2 – Schema per la classificazione delle aree ad alta densità di PS

TIPOLOGIA	DESCRIZIONE
AREE ATTIVE	Poligoni per cui almeno un dataset (asc o desc) individua HDPSA attive
AREE STABILI	Poligoni dove entrambi i dataset (asc e desc) individuano HDPSA stabili
AREE STABILI/INCERTE con evidenze di instabilità	Poligoni dove un dataset (asc o desc) individua HDPSA stabili e l'altro dataset (desc o asc), sebbene non individui HDPSA, presenta comunque PS, all'interno del poligono, con velocità medie superiori all'errore strumentale (+/- 2 mm/anno)
AREE STABILI/INCERTE con evidenze di stabilità	Poligoni dove un dataset (asc o desc) individua HDPSA stabili e anche l'altro dataset (desc o asc), sebbene non individui HDPSA, presenta comunque PS, all'interno del poligono, con velocità medie inferiori all'errore strumentale (+/- 2 mm/anno)
AREE STABILI/INCERTE	Poligoni dove un dataset (asc o desc) individua HDPSA stabili, mentre l'altro dataset (desc o asc) non presenta alcun PS al suo interno

Tramite questa procedura è quindi possibile individuare facilmente le aree soggette a movimenti generalizzati del terreno e associare a tali aree una geometria di tipo poligonale partendo da un dato di natura puntuale. Questo ci permette anche di discriminare, all'interno di aree in dissesto attive, la presenza di settori a diverso grado di stabilità in modo da definire meglio la geometria del dissesto e la sua pericolosità.

Ovviamente questo tipo d'informazione ha natura puramente qualitativa e deve necessariamente essere supportata da ulteriori analisi, mirate, in particolare, a definire le caratteristiche geologiche e morfologiche di dettaglio dell'area di studio.

La variazione spaziale dei valori di velocità registrati dai PS potrebbe infatti essere determinata, a parità di modulo del vettore reale, da variazioni locali nella direzione del movimento, oppure, in seguito alle considerazioni fatte ai paragrafi 4.2 e 5.1, a variazioni locali di pendenza ed esposizione del versante che portano a registrare una diversa componente del movimento lungo la LOS. In ogni caso dobbiamo tenere presente che il movimento rilevato lungo la LOS risulta sempre sottostimato, a meno che la direzione del movimento reale risulti parallela alla LOS stessa. Pertanto, il criterio di definizione delle HDPSA attive risulta comunque valido, avendo una natura puramente qualitativa, mentre le HDPSA stabili risultano affette da una forte incertezza. Per superare questo inconveniente è bene quindi verificare che l'area interessata da HDPSA stabili sia caratterizzata da valori di esposizione e inclinazione del versante tali da permettere di rilevare una significativa componente del movimento lungo la LOS.

4.6. Analisi delle serie storiche degli spostamenti

Le serie storiche dei valori di deformazione registrate dai satelliti ad ogni data di acquisizione delle immagini possono essere molto utili per valutare eventuali cambiamenti di trend nell'evoluzione del movimento analizzato e metterli in relazione con le possibili cause scatenanti.

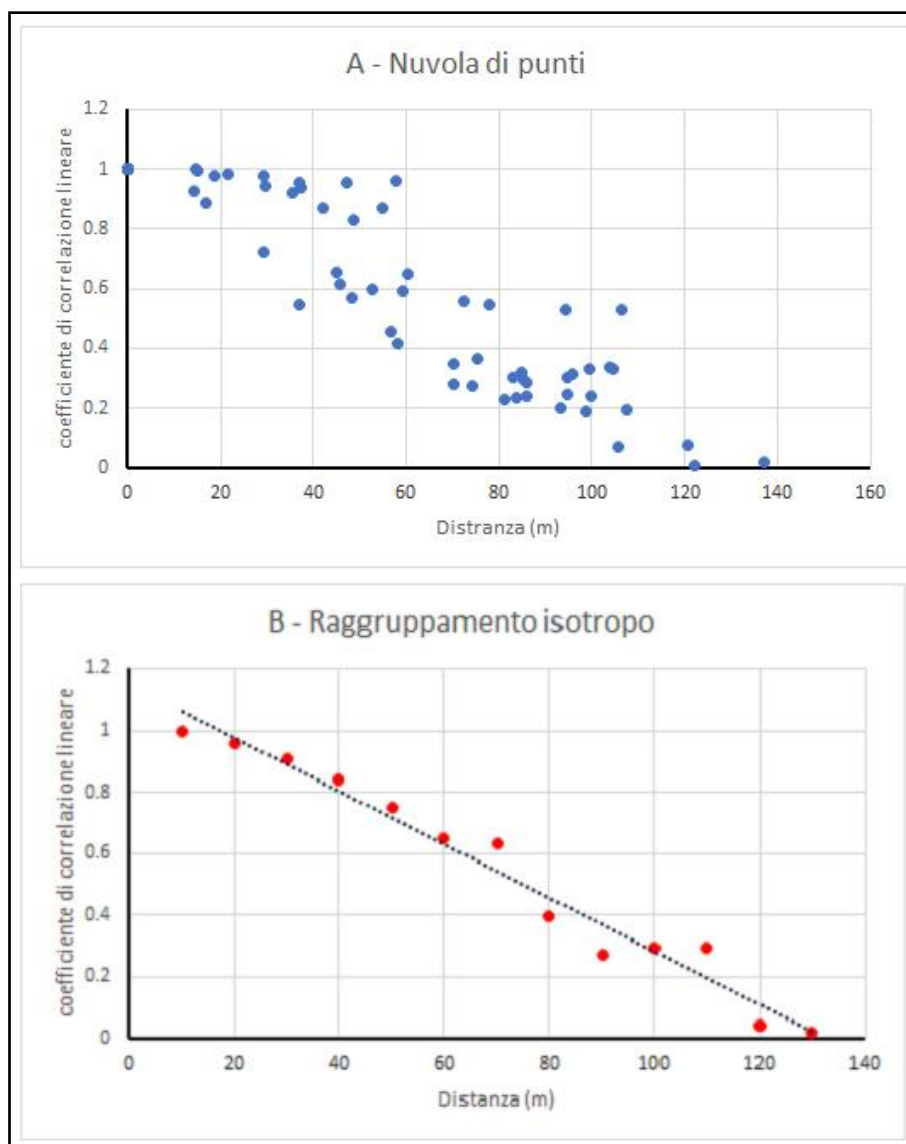


Figura 17 – Esempio di variazione del coefficiente di correlazione lineare tra coppie di PS con la distanza

Come abbiamo visto al paragrafo 4.1, una prima individuazione dei PS che presentano trend deformativi chiaramente non lineari può essere effettuata tramite la definizione del coefficiente di correlazione lineare degli spostamenti nel tempo. Valori molto inferiori a 1 di tale coefficiente permettono di individuare agevolmente le situazioni più probabilmente interessate da cambiamenti di trend, che necessiteranno comunque di essere successivamente valutate nel dettaglio.

Dobbiamo peraltro tenere presente che il trend deformativo di un singolo PS generalmente non può essere considerato rappresentativo dell'andamento generale della deformazione in una certa area, visto che ogni bersaglio radar può rispondere diversamente alla stessa sollecitazione in funzione delle sue caratteristiche fisico-meccaniche.

E' possibile però realizzare un processo di aggregazione di PS vicini, che presentano simile trend deformativo, in modo da ricostruire una serie storica mediata statisticamente rappresentativa di una determinata area. Il problema principale è quello di definire la geometria dell'intorno su cui effettuare il ricampionamento e a tal fine risulta molto utile verificare come il coefficiente di correlazione lineare tra coppie di PS in una determinata area varia con la distanza.

Un esempio di tale analisi è visualizzato nei grafici di Figura 17, dove sono riportati i valori dei coefficienti di correlazione lineare tra coppie di PS in un'area campione in funzione della loro distanza. In particolare, i singoli valori di tutte le coppie di PS considerate (Figura 17 A) sono stati successivamente aggregati in

intervalli di distanze, in modo da attribuire ad ogni intervallo la media dei coefficienti di correlazioni corrispondenti, supponendo quindi una variazione isotropa di tale parametro nello spazio (Figura 17 B).

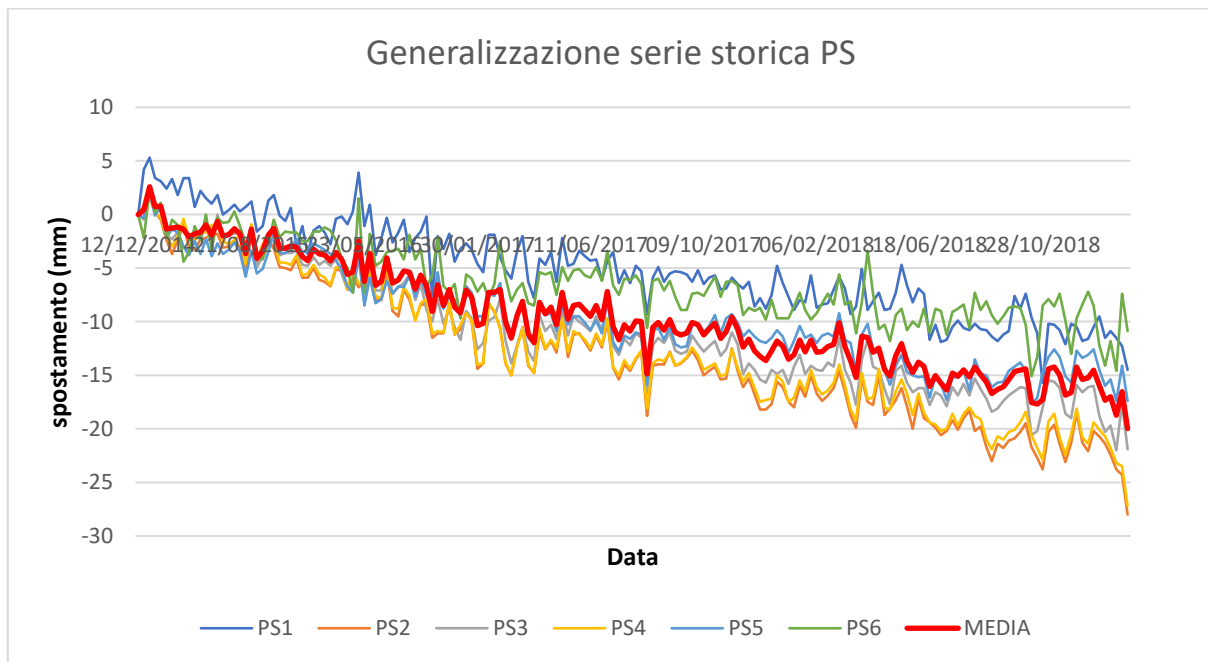


Figura 18 – Esempio di generalizzazione di una serie storica mediando dati puntuali vicini con simile trend deformativo

Da questo grafico di esempio è possibile verificare che se per effettuare l'aggregazione delle serie storiche di PS vicini utilizziamo un intorno circolare con raggio di 50 m, il coefficiente di correlazione lineare risulta mediamente superiore a 0.7, validando l'affidabilità di tale scelta. Ovviamente, una volta definita la geometria dell'intorno di aggregazione dei PS, sarà comunque necessario scartare gli eventuali PS che presentano comportamento incoerente rispetto alla media. Questo può essere effettuato sempre tramite il confronto tra i coefficienti di correlazione lineare dei PS che ricadono in quel determinato intorno di ricampionamento.

Un esempio di ricampionamento di una serie storica di PS a simile comportamento deformativo, selezionati tramite la procedura sopra esposta, è riportato nel grafico di Figura 18.

Questa procedura risulta peraltro molto laboriosa e si presta male all'analisi dei fenomeni franosi, caratterizzati da una distribuzione piuttosto eterogenea delle deformazioni nello spazio. Nel caso di fenomeni di subsidenza, come vedremo in seguito, può invece risultare molto utile effettuare un'aggregazione di PS vicini a simile comportamento deformativo, specialmente per evidenziare una eventuale correlazione tra andamento della deformazione nel tempo e prelievi idrici su determinati pozzi di riferimento.

5. Utilizzo dei dati interferometrici PSInSAR per l'analisi di fenomeni gravitativi di versante

Come abbiamo visto al paragrafo 2.2.2, il fenomeno dell'equivocazione di fase che si verifica quando tra due successive acquisizioni si registra uno sfasamento pari ad una lunghezza d'onda o un suo multiplo, fa sì che con questa tecnica possano essere analizzati solo movimenti relativamente lenti. In particolare, quando la componente dello spostamento lungo la LOS tra due successive acquisizioni risulta maggiore o uguale a 1/4 della lunghezza d'onda utilizzata (circa 1.4 cm per i satelliti ERS ed ENVISAT), si verifica l'impossibilità di registrare lo spostamento reale e il valore di velocità misurato risulta fortemente sottostimato. In base a queste considerazioni, in Figura 19 viene riportato uno schema con l'individuazione delle tipologie di frana che, in linea generale, possono essere analizzate efficacemente con questa tecnologia.

TIPOLOGIA	MATERIALE	MONITORAGGIO TECNICA PSI
Crollo	Roccia/detrito/terra	NO
Ribaltamento	Roccia/detrito/terra	NO
Scivolamento	Roccia	SI
	Detrito/terra	SI
Colata	Roccia	SI
	Terra	Parzialmente
	Detrito	NO
Espansione	Roccia/detrito/terra	Parzialmente

Figura 19 (da MINAMB, 2009) – Tipologia di frane analizzabili con tecnica PS

Inoltre, dobbiamo tenere presente che nell'analisi dei dissesti gravitativi, operando in ambienti collinari e montani, è più probabile che le immagini satellitari siano affette dai fenomeni di foreshortening, layover e shadowing visti al paragrafo 1, rendendo più difficile l'individuazione di bersagli radar stabili nel tempo. Anche per questo motivo i fenomeni di crollo, che generalmente interessano pareti sub-verticali, non sono monitorabili con tecnica PS.

Infine, sempre per le considerazioni svolte al paragrafo 1, in geometria scendente non potranno essere analizzati in modo soddisfacente i fenomeni franosi che interessano versanti esposti verso ovest, mentre in geometria discendente verranno risolti male i versanti esposti verso est. I versanti esposti a nord e a sud risultano invece visibili in entrambe le geometrie, ma i movimenti tendono ad essere fortemente sottostimati, specialmente se, come nel caso di movimenti franosi, è presente una importante componente orizzontale, come spiegato meglio nel paragrafo successivo.

5.1. Valutazione sugli spostamenti rilevati lungo la LOS

Come visto al paragrafo 4.2, i valori di spostamento e velocità media dei PS sono misurati lungo la linea di vista del satellite (LOS) e quindi ciò che viene osservato non è lo spostamento reale del bersaglio radar ma solo la sua componente lungo tale direzione. Il valore registrato sarà tanto minore quanto più la direzione del vettore spostamento reale si discosterà dalla direzione di puntamento del sensore, fino al caso limite di moto perpendicolare alla LOS in cui lo spostamento misurato risulterà nullo.

La LOS risulta generalmente abbastanza inclinata rispetto al Piano Orizzontale (PO), pertanto i valori di velocità e spostamento registrati nel caso di movimenti con forte componente orizzontale, come nel caso di movimenti franosi, possono risultare molto sottostimati. Quindi, se i PS rilevano degli spostamenti generalizzati su una determinata area, è molto probabile che essa sia effettivamente interessata da un movimento. D'altra parte, se una certa area è caratterizzata dalla presenza diffusa di PS stabili, non è assolutamente detto che tale area sia stabile, in quanto potrebbe comunque essere interessata da spostamenti, anche importanti, le cui componenti sulle LOS ascendenti e/o discendenti risultano però molto piccole.

Nei grafici di Figura 20 (ERS) e 21 (SENTINEL-1) vengono riportati, in funzione dell'orientamento del vettore velocità reale (V_{reale}) come definito al paragrafo 4.2, i valori percentuali di stima registrati lungo le LOS ascendente e discendente tenendo conto della direzione di spostamento reale dei satelliti (circa +/- 10°N). In particolare, trattando di moti a carattere prevalentemente orizzontale con componente nadirale (movimenti franosi), vengono considerati solamente alcuni valori d'inclinazione variabili tra 0° e -40°.

Nel caso del satellite ERS, l'elevata inclinazione sul PO della LOS (circa 67°) determina una importante sottostima del moto orizzontale, che ovviamente diminuisce all'aumentare dell'inclinazione del vettore (V_{reale}). Nel caso di moto puramente orizzontale (inclinazione = 0°) il valore registrato varia tra 0, quanto

l'esposizione coincide con la proiezione orizzontale della LOS, al 39% del valore reale, quando l'esposizione risulta ruotata di 90° rispetto al caso precedente.

Il satellite SENTINEL-1 riesce invece a risolvere meglio questo tipo di moto in seguito alla minore inclinazione sul PO della LOS (circa 52°), permettendo, sempre nel caso di moto puramente orizzontale, di rilevare fino al 62% del valore reale.

I grafici di Figura 20 e 21 ci aiutano a capire come, nell'analisi di movimenti franosi, i valori registrati dal satellite possono risultare fortemente sottostimati rispetto ai valori reali. Inoltre, se è noto il valore del vettore (V_{reale}) in base ad altre tipologie di dati (inclinometrici, topografici, etc.), questo tipo di analisi ci permette di applicare i necessari coefficienti correttivi ai valori registrati dai satelliti per verificare la coerenza dei risultati ottenuti.

Inoltre, se ipotizziamo che il movimento del versante avvenga lungo la linea di massima pendenza, ovvero che il vettore spostamento presenti un valore di esposizione e inclinazione uguali a quelli del versante stesso, possiamo calcolare, per ogni possibile combinazione dei due parametri ottenuta dall'analisi di un modello digitale del terreno, la distribuzione spaziale della percentuale di stima della velocità reale effettivamente rilevata lungo le LOS ascendente e discendente.

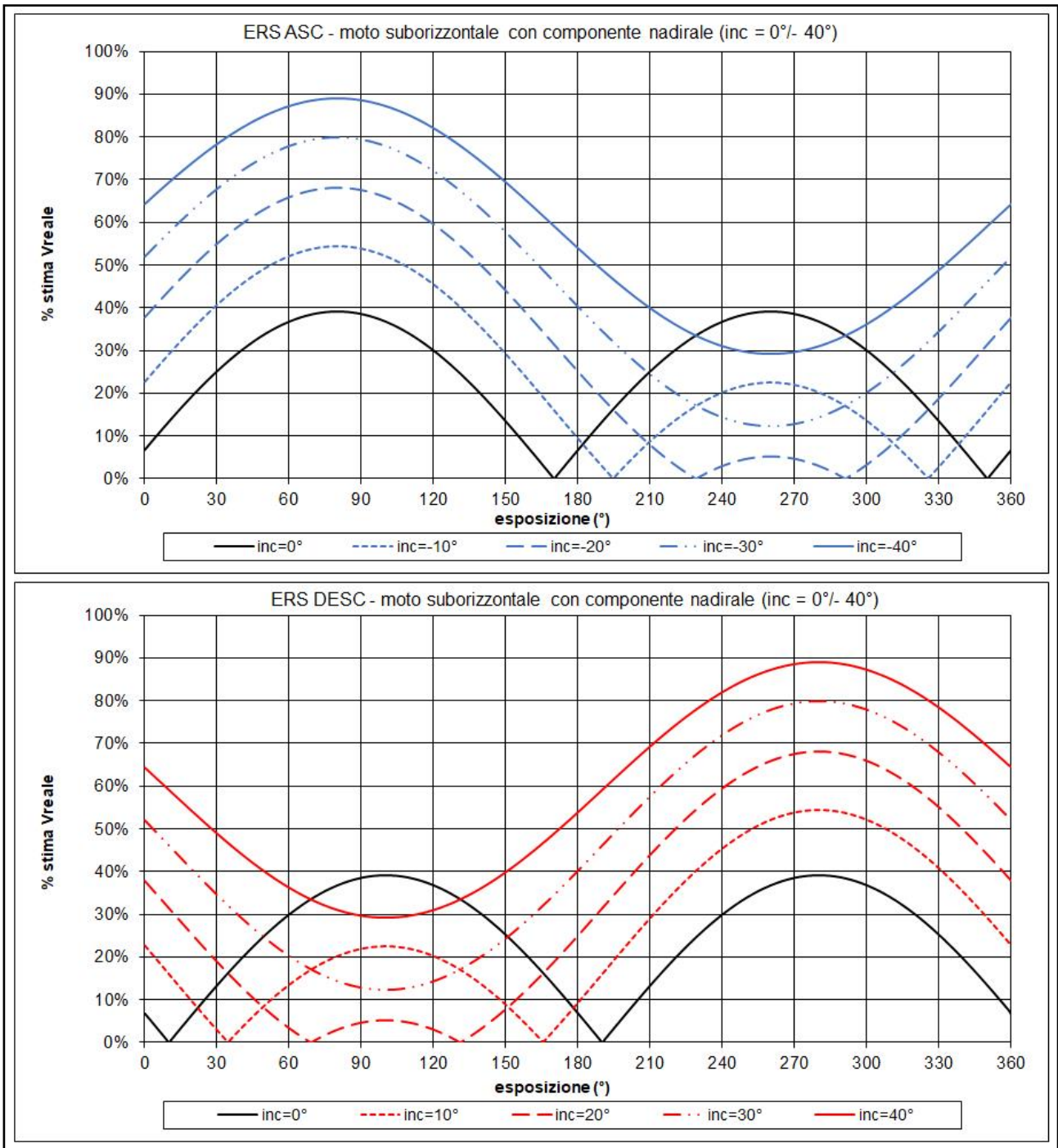


Figura 20 – Percentuale di movimento reale registrato lungo le LOS ascendente e discendente in funzione dell'orientamento del vettore Vreale espresso in termini di esposizione e inclinazione nel caso del satellite ERS

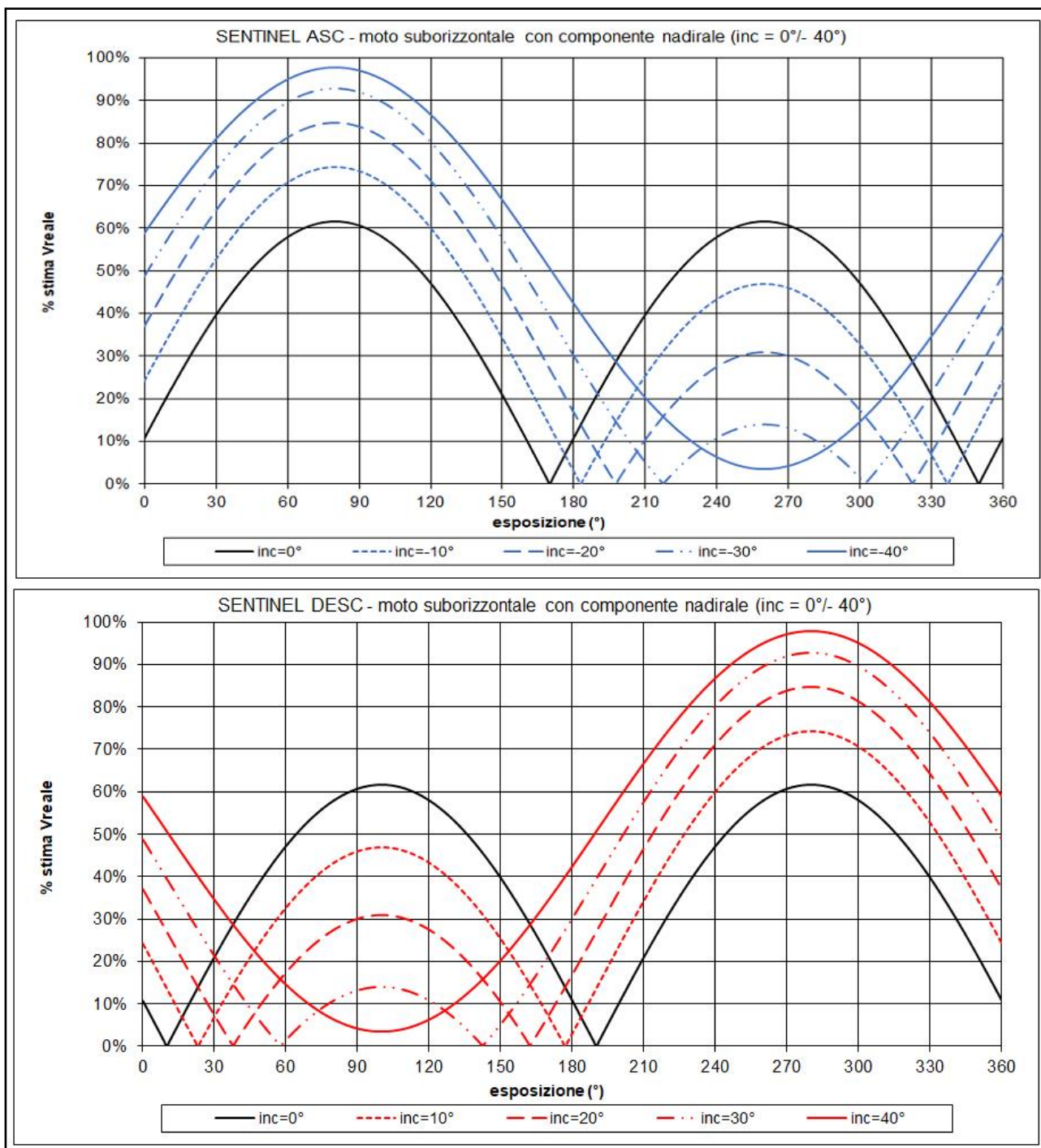


Figura 21 – Percentuale di movimento reale registrato lungo le LOS ascendente e discendente in funzione dell’orientamento del vettore Vreale espresso in termini di esposizione e inclinazione nel caso del satellite SENTINEL-1

In Figura 22 è mostrato un esempio di questa analisi per un’area ubicata in prossimità dell’abitato di Tosi nel Comune di Reggello (FI) relativamente al satellite SENTINEL-1. Come possiamo osservare, in alcune aree le velocità rilevate dal satellite risultano fortemente sottostimate rispetto alle caratteristiche del movimento ipotizzate, mentre in altre aree riusciamo ad ottenere dei valori molto prossimi a quelli reali. Dall’immagine appare peraltro evidente che le aree fortemente sottostimate in geometria ascendente (Figura 22 A) risultano risolte relativamente bene in geometria discendente (Figura 22 B) e viceversa, confermando l’importanza dell’esame congiunto dei due dataset e la loro complementarità.

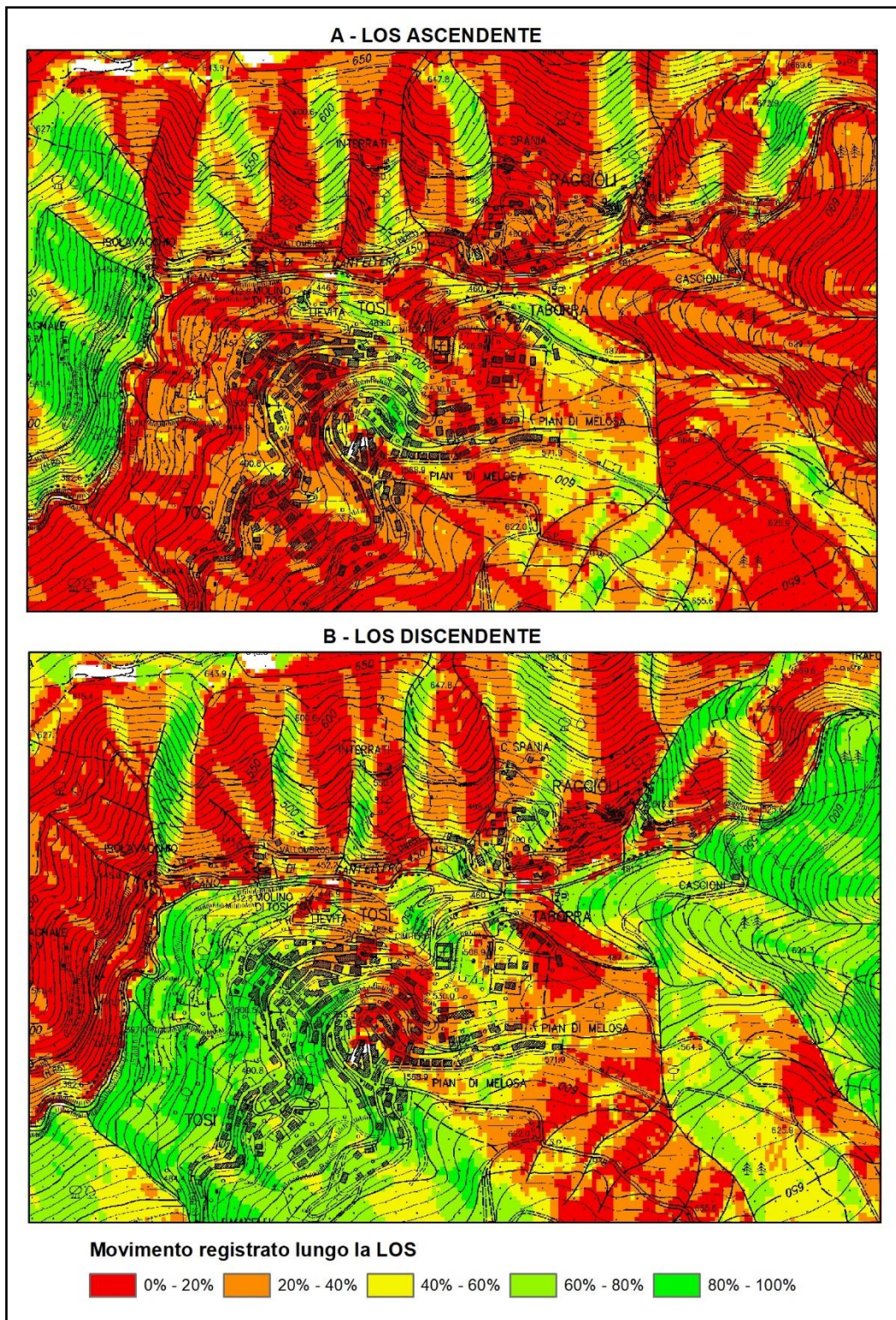


Figura 22 – Esempio di andamento spaziale della percentuale di movimento reale registrato lungo le LOS ascendente (A) e discendente (B) ipotizzando un movimento lungo la linea di massima pendenza ottenuta da DEM

Quindi, quando analizziamo i dati PS che interessano un movimento gravitativo di versante, risulta di fondamentale importanza confrontare il dato ottenuto dalle elaborazioni interferometriche delle immagini satellitari con la percentuale di movimento effettivamente rilevata lungo la LOS da quello specifico satellite, ipotizzando un movimento del versante lungo la linea di massima pendenza. In caso contrario, si potrebbe erroneamente attribuire uno stato “stabile” ad un movimento franoso solo perché le velocità registrate lungo la LOS rientrano nell’intervallo di sensibilità della tecnica di elaborazione (+/- 2 mm/anno), senza quindi

tenere conto che la direzione di osservazione del satellite può non essere adatta a risolvere adeguatamente il moto analizzato. Tale considerazione diventa ancora più importante se l'area di analisi risulta coperta da una sola geometria di acquisizione (ascendente o discendente), per cui non è neanche possibile effettuare un'analisi congiunta dei due dataset.

A titolo di esempio, in figura 23 viene riportato il confronto tra le velocità di movimento registrate lungo le LOS ascendente e discendente del satellite SENTINEL-1 presso l'abitato di Chitignano (AR) e le corrispondenti percentuali di movimento reale che verrebbero effettivamente registrate lungo le due linee di vista nell'ipotesi che il movimento principale avvenga lungo la linea di massima pendenza del versante. Come possiamo osservare, il dataset ascendente evidenzia velocità dei PS relativamente basse con una media uguale a 1.7 mm/anno e valori massimi, in avvicinamento, pari a 3.6 mm/anno. Il dataset discendente, al contrario, mostra evidenti spostamenti generalizzati su tutta l'area con una media pari a -6.1 mm/anno e valori massimi, in allontanamento, uguali a -8.9 mm/anno. L'esame congiunto dei due dataset mostra un movimento prevalente verso i quadranti occidentali, coerentemente con le caratteristiche morfologiche del versante analizzato. Peraltro, se osserviamo la distribuzione spaziale della percentuale di movimento rilevata lungo le LOS, possiamo vedere che mentre in geometria ascendente le caratteristiche di esposizione e pendenza del versante portano ad una forte sottostima delle velocità rilevate da satellite, con un errore medio del 70%, in geometria discendente la stima delle velocità risulta molto più affidabile, con un errore medio che si riduce a circa il 40%.

Nel caso in esame quindi, se avessimo analizzato solo il dataset ascendente, avremmo individuato un'area prevalentemente stabile con elementi di instabilità relativamente circoscritti e caratterizzati da valori di spostamento prossimi ai limiti di sensibilità della tecnica di analisi. L'esame congiunto dei due dataset e, in particolare, l'analisi della stima dell'errore associato alle LOS nel caso di movimento lungo la linea di massima pendenza, ci ha invece permesso di evidenziare un'area piuttosto estesa caratterizzata da movimenti generalizzati. Ovviamente, le ipotesi di base sulla tipologia di movimento in atto, la scelta del modello digitale del terreno da cui derivare esposizione e pendenza dei versanti e le caratteristiche geometriche di acquisizione del satellite utilizzato per l'analisi, risultano fondamentali per la corretta definizione dell'errore associato alle velocità dei PS lungo le LOS.

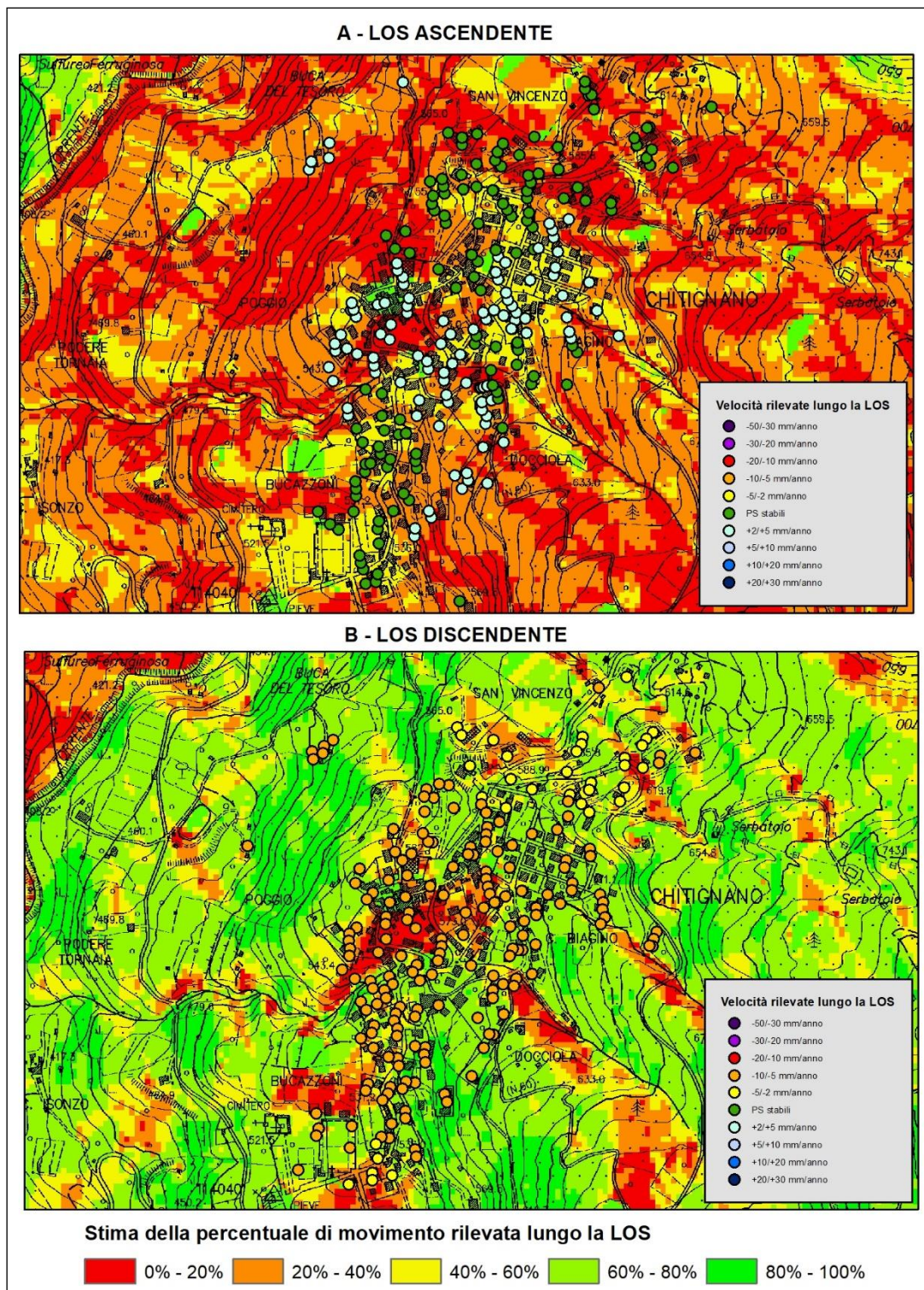


Figura 23 – Confronto tra valori di velocità registrati lungo le LOS ascendente (A) e discendente (B) nei pressi dell’abitato di Chitignano (AR) e le corrispondenti percentuali di movimento reale registrato ipotizzando un movimento lungo la linea di massima pendenza (Satellite SENTINEL-1)

5.2. Confronto tra dataset ascendente e discendente

L'importante componente orizzontale generalmente presente nei movimenti franosi, fa sì che i dataset ascendente e discendente di una stessa area presentino valore assoluto del modulo molto simile tra loro, ma verso (segno) opposto. Il satellite che si trova posizionato alle spalle del fenomeno osservato registrerà infatti un allontanamento (segno negativo) dei PS, mentre il satellite che si trova di fronte ne registrerà un avvicinamento (segno positivo). Inoltre, il valore assoluto di velocità media in allontanamento sarà

sensibilmente più alto di quello in avvicinamento, così che il vettore risultante, oltre a risultare in uscita dal versante, presenterà anche la componente verticale verso il basso.

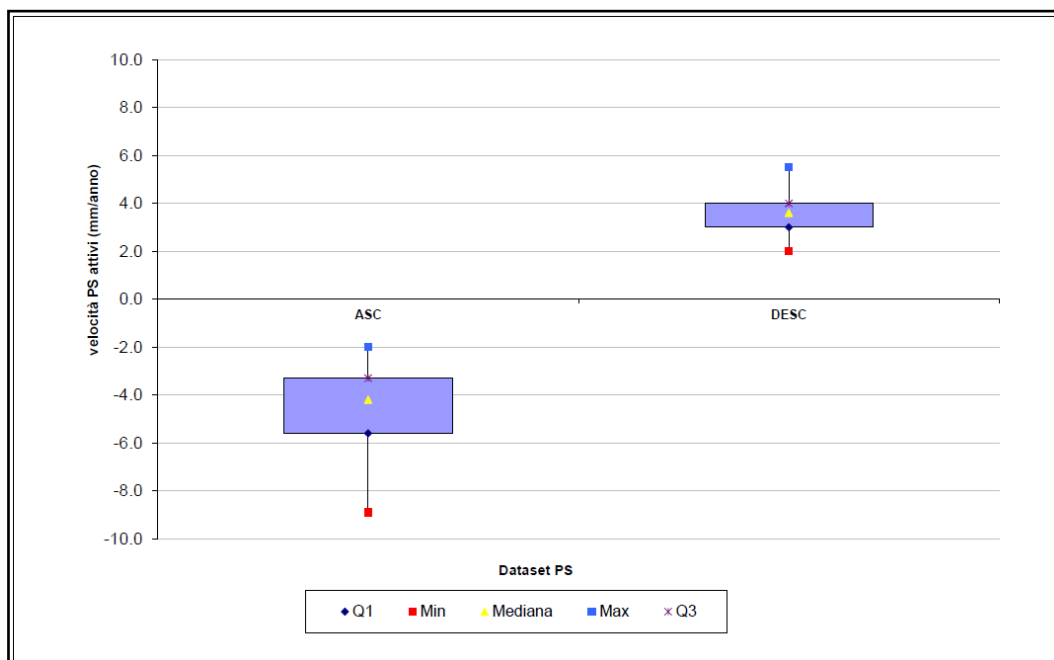


Figura 24 – Esempio di distribuzione statistica dei valori di velocità registrati in modalità ascendente e discendente per un'area in frana con esposizione prevalente verso est (Q1=1° quartile, Min=minimo, Mediana=2° quartile, Max=massimo, Q3=terzo quartile)

Nel grafico di Figura 24 è riportato il confronto tra le distribuzioni statistiche dei valori di velocità registrati nelle due geometrie di acquisizione per un'area interessata da deformazioni gravitative di versante. La direzione del movimento è circa verso est, coerentemente con l'esposizione del versante, il dataset ascendente presenta valori negativi con una media pari a -4,6 mm/anno, mentre il dataset discendente presenta valori positivi con media pari a 3,5 mm/anno. Possiamo inoltre osservare che in geometria scendente i valori di velocità rilevati dal satellite risultano maggiormente distribuiti che in geometria discendente. Infatti, per le considerazioni fatte al paragrafo 1 sull'effetto di foreshortening, il versante in esame, essendo esposto prevalentemente verso est, verrà risolto meglio in geometria ascendente.

Per avere un'idea più precisa dell'informazione ottenuta dall'esame congiunto dei due dataset nelle diverse zone del versante, è possibile inoltre procedere alla ricostruzione del vettore spostamento nel piano EOZN, come descritto al paragrafo 4.3. Questo ci permette, oltre alla verifica del verso di spostamento prevalente, di ottenere anche informazioni di massima sulla geometria del dissesto esaminato, come meglio specificato al paragrafo 5.5.

5.3. Individuazione delle HDPSA

Nel paragrafo 4.5 è riportato un possibile criterio per la trasformazione dell'informazione puntuale offerta dai PS in una informazione a geometria poligonale più facilmente utilizzabile nell'analisi di movimenti franosi spazialmente ben definiti. Trattandosi di analisi su dissesti gravitativi di versante, dobbiamo comunque tenere presente che le variazioni spaziali di velocità registrate dai PS potrebbero essere imputabili anche a variazioni locali della direzione del vettore spostamento reale o delle caratteristiche geometriche del versante (pendenza ed esposizione), come meglio specificato nei paragrafi 4.2 e 5.1. Per tale motivo la metodologia proposta non ha lo scopo di effettuare analisi quantitative sulle variazioni di velocità all'interno del corpo di frana, ma fornire unicamente un criterio per discriminare in maniera qualitativa i settori a diverso grado di stabilità coerentemente con le caratteristiche geologiche e morfologiche delle aree indagate.

Una applicazione di questa metodologia è riportata in Figura 25, dove sono mostrati i risultati ottenuti utilizzando i dataset ascendente e discendente del satellite ENVISAT relativamente al periodo 2003-2010.

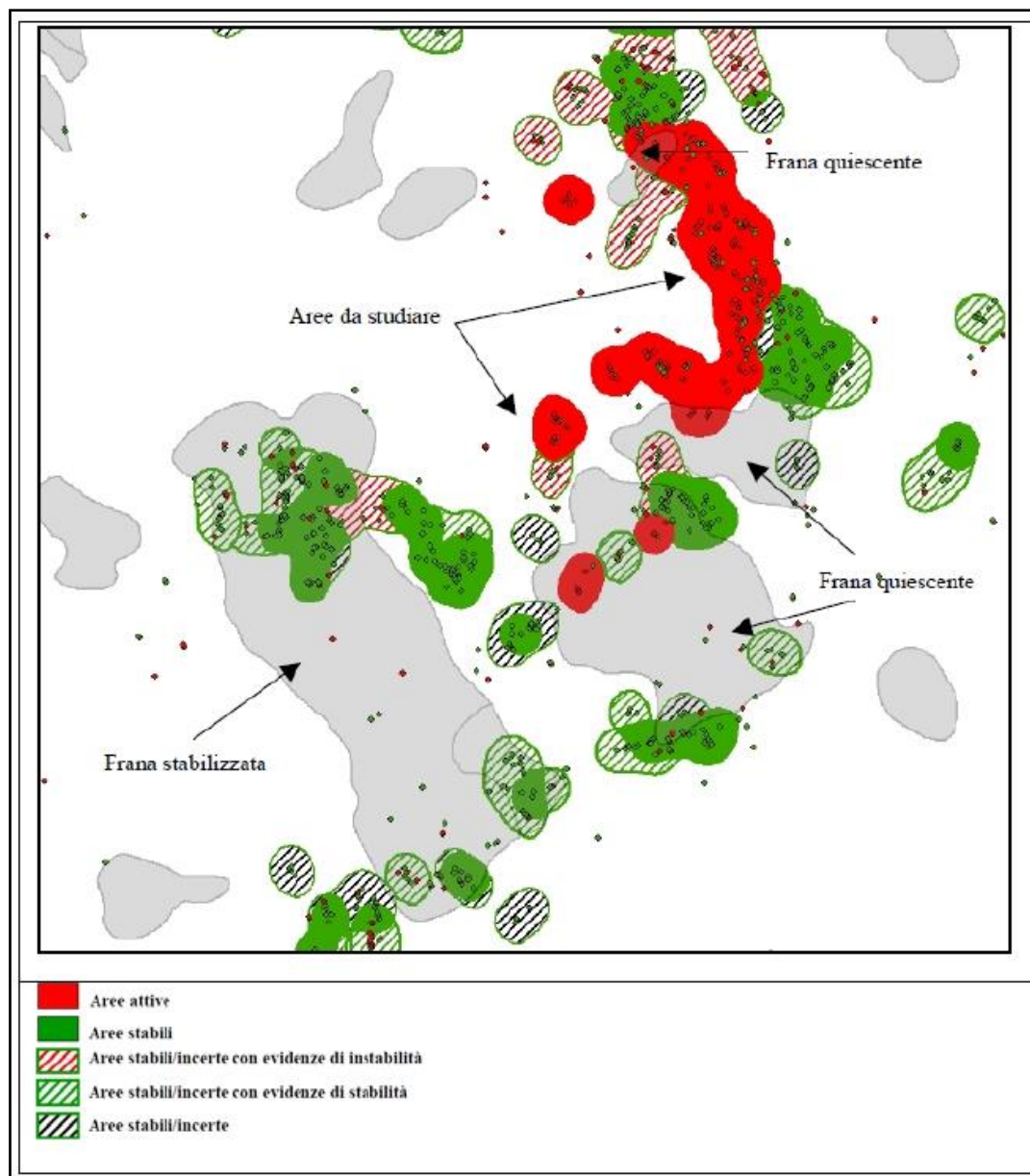


Figura 25 – Esempio di individuazione e classificazione delle aree ad alta densità di PS

Come possiamo osservare, l'individuazione delle HDPSA permette di identificare, all'interno delle aree in dissesto, le zone con forti evidenze di movimento da quelle dove invece le elaborazioni svolte indicano la presenza di un sostanziale stato di stabilità. In questo modo è possibile individuare, all'interno di uno stesso fenomeno, le aree a maggior rischio per le strutture antropiche e la popolazione residente, offrendo un utile supporto nella definizione delle priorità d'intervento per la messa in sicurezza del territorio.

In questo esempio inoltre possiamo vedere che in alcuni casi vi è una sostanziale coerenza tra stato di attività attribuito sulla base di dati bibliografici e analisi di campagna e quello evidenziato dai dati satellitari, mentre in altre situazioni è necessario procedere ad una revisione della geometria dei dissesti o ad approfondimenti conoscitivi per l'identificazione di nuove aree non individuate nel censimento.

In Figura 26 sono riportati i risultati di un lavoro svolto dall'Autorità di Bacino dell'Arno nel 2011 finalizzato a testare l'utilizzo delle HDPSA come integrazione al censimento delle aree in dissesto di tipo tradizionale. I grafici a torta rappresentano, per ognuno dei tre stati di attività considerati nel censimento, la presenza settori a diverso grado di attività individuati con procedura HDPSA applicata ai dati derivati dai satelliti ERS, RADARSAT-1 ed ENVISAT. Come possiamo vedere, nel caso delle frane attive, l'informazione HDPSA ha permesso di discriminare settori attivi da settori stabili, con possibilità di individuare le aree a rischio

idrogeologico più elevato. Per quanto riguarda invece le frane quiescenti, questa analisi ha evidenziato che circa il 30% delle aree presenta forti evidenze di instabilità, sottolineando la necessità di procedere ad una parziale revisione della geometria per la delimitazione dei settori attivi, eventualmente effettuando un confronto tra informazioni acquisite in periodi temporali distinti. Per quanto riguarda infine le frane stabilizzate, sebbene rappresentate solo dal 16% di tutti i dissesti con informazione HDPSA, circa il 40% hanno messo in risalto la presenza di aree attive, con necessità di rivederne lo stato di attività complessivo o, eventualmente, individuare al loro interno aree potenzialmente instabili.

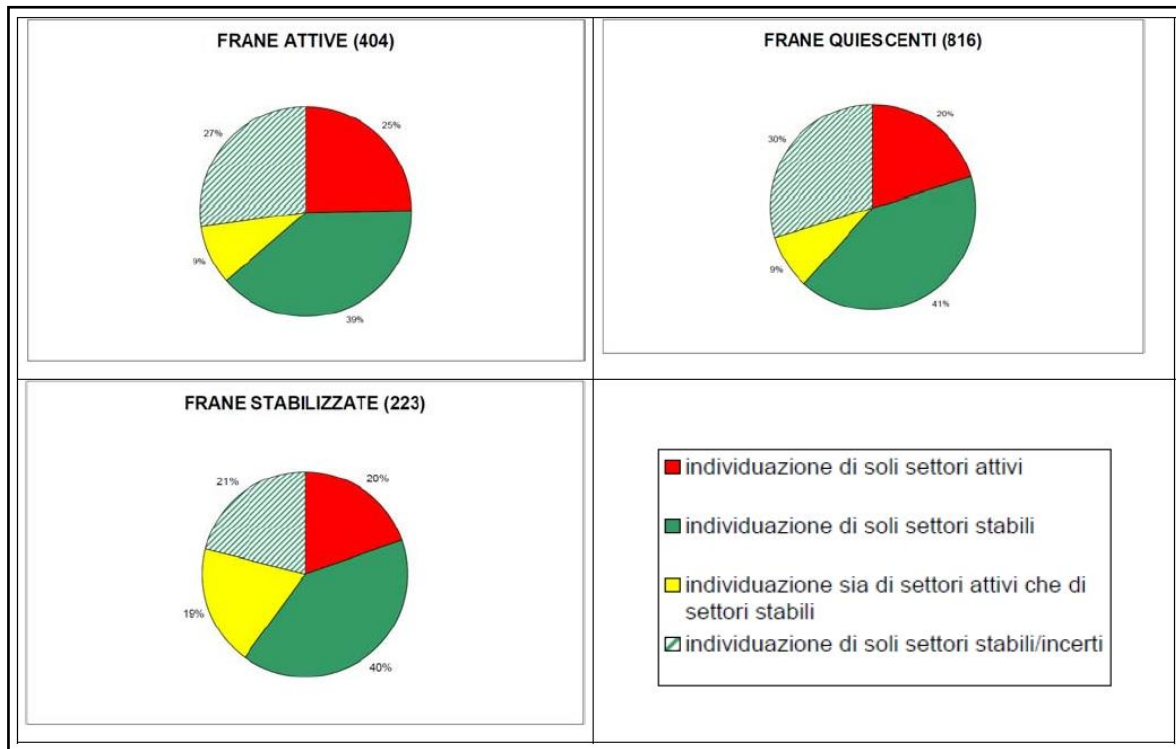


Figura 26 – Analisi dei settori a diverso stato di attività nelle aree in frana (2011)

Ovviamente, considerato il criterio di densità spaziale dei PS alla base della definizione delle HDPSA, la loro individuazione sarà possibile solamente in zone con rilevante presenza di strutture antropiche ad elevato potere riflettente nei confronti della radiazione radar emessa dal satellite. A titolo di esempio, sempre in riferimento al lavoro del 2011 sopra citato, il grafico di Figura 27 mostra come la percentuale di frane con informazione HDPSA sia strettamente dipendente dal numero di edifici presenti al loro interno.

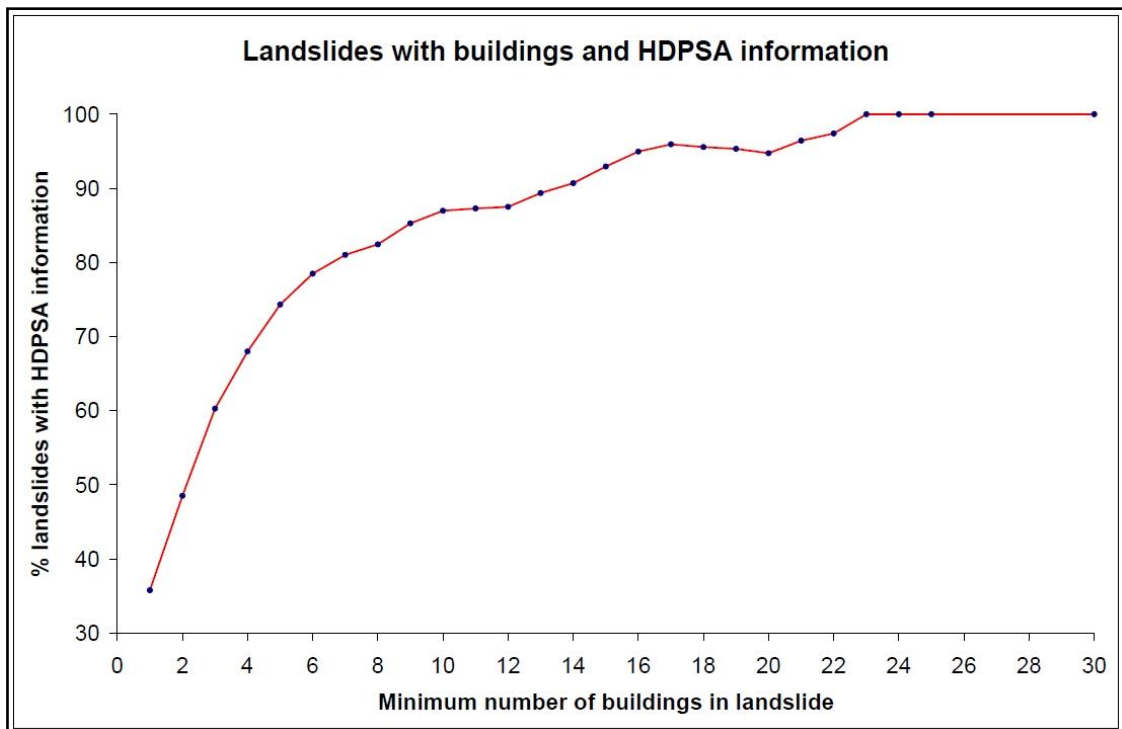


Figura 27 – Relazione tra frane con informazione HDPSA e numero di edifici presenti nell'area in frana (2011)

Come possiamo osservare, mentre le HDPSA possono fornire informazioni utili alla caratterizzazione dei dissesti per circa il 60% delle aree in frana con almeno tre edifici al loro interno, la stessa informazione può invece essere utilizzata per circa il 93% delle frane con almeno 15 edifici, fino a interessare tutte le aree in dissesto con almeno 23 edifici.

5.4. Valutazioni sullo stato di attività

Il confronto tra valori di velocità media acquisiti per una stessa area in periodi temporali distinti, ovvero da diversi satelliti, può permettere di effettuare importanti valutazioni circa lo stato di attività del fenomeno osservato. Questo risulta particolarmente vero nel caso di fenomeni franosi, dove lo stato di attività viene generalmente utilizzato per definire la pericolosità del fenomeno e il conseguente stato di rischio per gli elementi antropici interessati.

Come visto al paragrafo 4.4, per effettuare questo confronto è innanzi tutto necessario procedere al ricampionamento su griglia comune dei dataset ascendente e/o discendente dei diversi satelliti considerati, in modo da rendere i valori di velocità media tra loro confrontabili. In Figura 28 è riportato un esempio di questa tipologia di analisi effettuata presso l'abitato di Bivigliano (FI) per confronto tra le velocità medie misurate dal satellite ERS nel periodo 1992-2000 e quelle misurate dal satellite ENVISAT nel periodo 2003-2010. In particolare, tale confronto è stato effettuato utilizzando solo il dataset discendente, visto che l'area indagata non risulta coperta dal satellite ERS in geometria ascendente (vedi Figura 11). In Figura 28 A la griglia di ricampionamento utilizzata (maglia 100 m) è stata classificata in accordo con la matrice dello stato di attività di figura 14 considerando i due satelliti di riferimento. Come possiamo osservare, le celle della matrice ci permettono di discriminare settori a diverso stato di attività e, conseguentemente, assegnare alle frane interessate da questa informazione un valore di riferimento per successivi approfondimenti d'indagine.

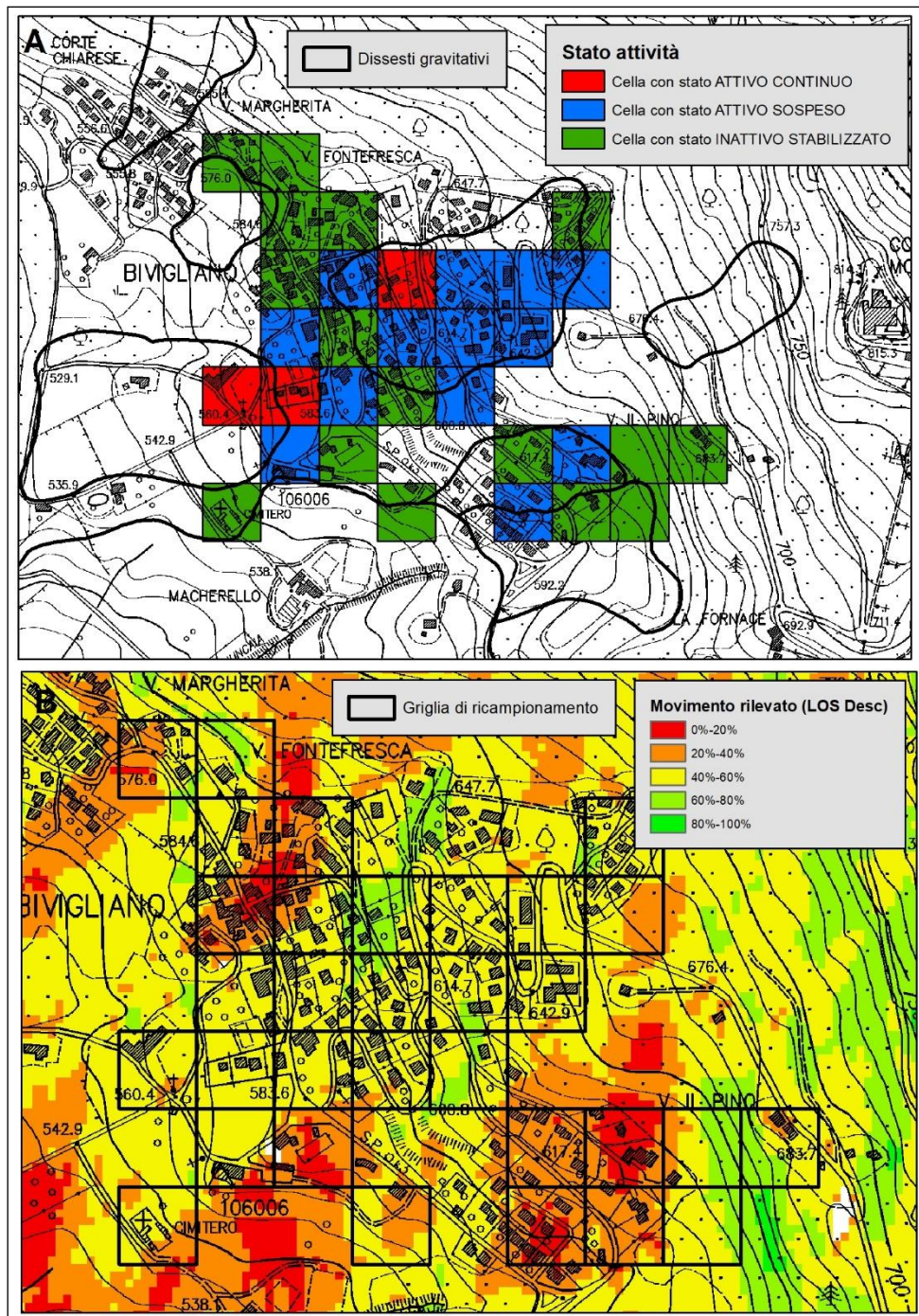


Figura 28 – Esempio di definizione dello stato di attività per confronto tra valori registrati in periodi temporali distinti (satelliti EER ed ENVISAT). Per spiegazione vedi testo

In Figura 28 B la stessa griglia di ricampionamento utilizzata per l'analisi viene confrontata con la mappa di distribuzione della percentuale di movimento rilevata lungo la LOS discendente, ipotizzando che lo spostamento avvenga lungo la linea di massima pendenza locale del versante (vedi paragrafo 5.1). Come abbiamo visto, considerato che il movimento rilevato lungo la LOS risulta comunque sottostimato, l'informazione qualitativa sullo stato di attività assegnata alle celle attive o quiescenti può essere considerata sufficientemente affidabile, mentre la definizione delle aree stabili necessita di verificare nel dettaglio le condizioni di pendenza ed esposizione locali. Nel caso in esame possiamo vedere che la gran parte delle celle stabili ricade in zone dove la percentuale di movimento rilevato dal satellite risulta superiore 50-60% del movimento reale e quindi l'informazione può essere considerata sufficientemente attendibile. Peraltro,

alcune celle classificate come aree stabili ricadono in zone dove il movimento rilevato lungo la LOS risulta fortemente sottostimato, rendendo impossibile la conferma della loro stabilità.

5.5. Valutazioni sulla geometria del fenomeno osservato

Come abbiamo visto nel paragrafo 4.3, la ricostruzione del vettore spostamento ottenuta dall'analisi congiunta delle due geometrie di acquisizione porta ad individuare, nel caso di moti a prevalente componente orizzontale, angoli del vettore spostamento nel piano EOZN variabili tra 45° e 135° (moto verso est) oppure tra 225° e 315° (moto verso ovest). Nel caso di fenomeni franosi dobbiamo comunque tenere presente che il movimento avviene lungo una superficie di scivolamento complessa, la cui geometria si riflette sulle caratteristiche degli spostamenti registrati in superficie. Pertanto, sebbene nel suo insieme il movimento presenti una importante componente orizzontale, nelle varie zone del versante potranno verificarsi situazioni molto diverse tra loro.

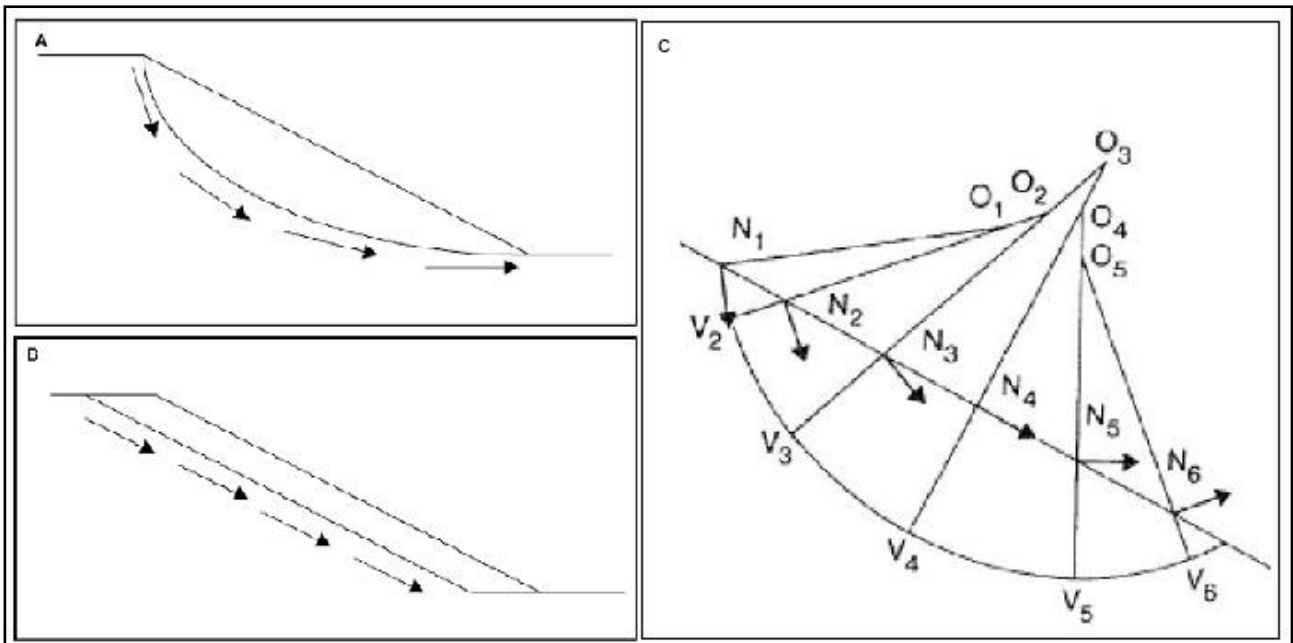


Figura 29 – Andamento del vettore spostamento lungo la superficie di scorrimento nel caso di frana di scivolamento di tipo rotazionale (A) e di tipo traslazionale (B). In (C) è riportato un metodo grafico per ricostruire una superficie di scivolamento da misure di deformazione rilevate in superficie (Carter & Bentley, 1985; Cruden, 1986)

Come mostrato in Figura 29, ad esempio, uno scivolamento rotazionale sarà caratterizzato da spostamenti prossimi alla verticale nella zona di testa del corpo di frana e quasi orizzontali in corrispondenza del piede, mentre uno scivolamento traslazionale sarà caratterizzato da spostamenti circa paralleli tra loro nelle varie zone del versante. L'andamento del vettore EOZN lungo la sezione di un versante interessato da un dissesto gravitativo può quindi fornirci utili indicazioni per comprendere meglio la geometria del fenomeno analizzato. Ovviamente dobbiamo sempre tenere presente che non necessariamente il bersaglio radar registrerà uno spostamento coerente con quello che si verifica sulla superficie di scivolamento, ma nel caso di movimenti franosi molto estesi e ad alta densità di PS è comunque possibile effettuare analisi statistiche sulla distribuzione delle direzioni di spostamento nelle diverse zone del versante che possono fornirci importanti informazioni sulla geometria del dissesto, specialmente se supportate da altre tipologie di dati.

5.6. Un esempio applicativo – DGPV nell'area di Momigno (PT)

Il versante dell'Appennino pistoiese dove è ubicato l'abitato di Momigno si trova nel Comune di Marliana (PT) ed è caratterizzato dall'affioramento della formazione del Macigno che, in quest'area, si presenta molto disturbata con forti spessori di coltri detritiche ed evidenti segni di mobilitazione. In particolare, l'area è interessata da un esteso fenomeno gravitativo, riconducibile ad una Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV) classificabile come scorrimento in blocco (Figura 30).

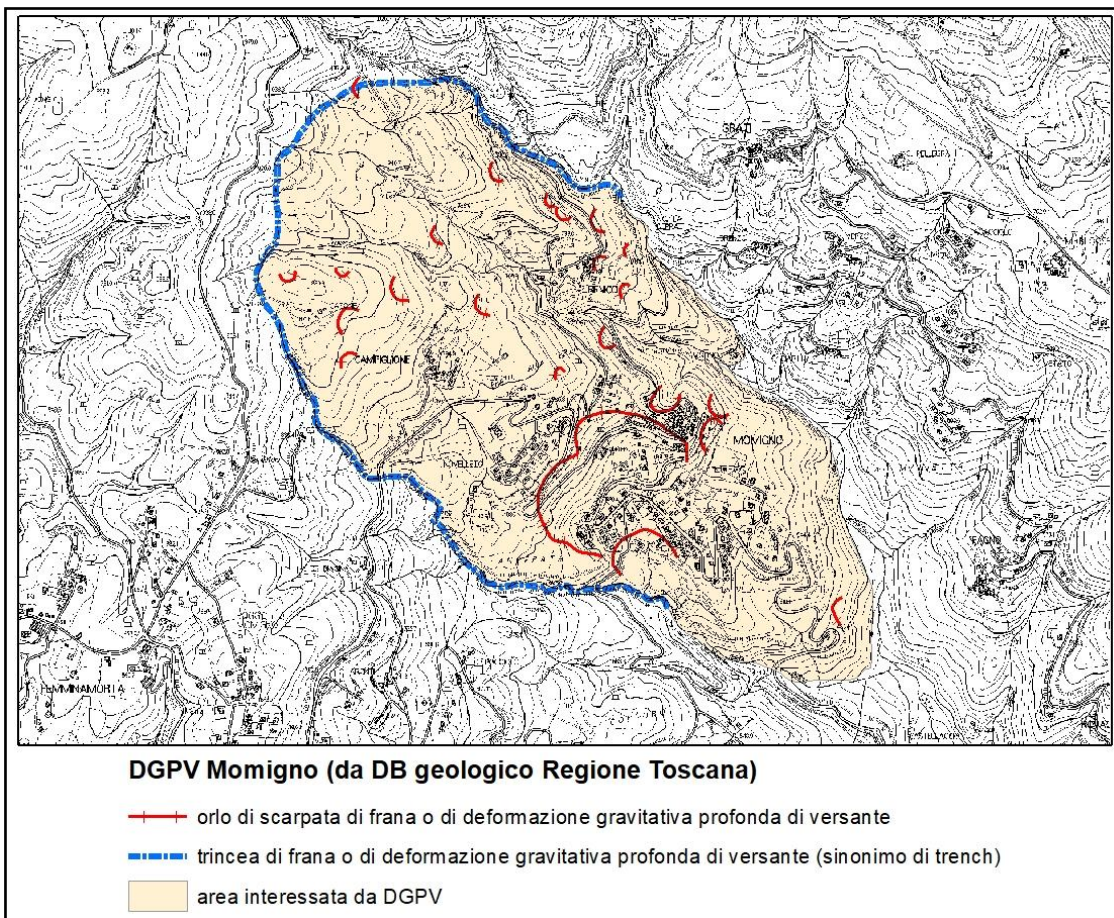


Figura 30 – Inquadramento geomorfologico dell'area interessata da DGPV nei pressi dell'abitato di Momigno (PT)

Le DGPV si prestano generalmente molto bene all'analisi tramite tecnica PSInSAR, in quanto caratterizzate da velocità medie annue molto basse. Nel caso in esame, il versante nel suo insieme presenta una esposizione verso E-SE, con una importante componente del movimento verso E, rendendo così possibile l'analisi degli spostamenti attraverso la linea di vista dei satelliti.

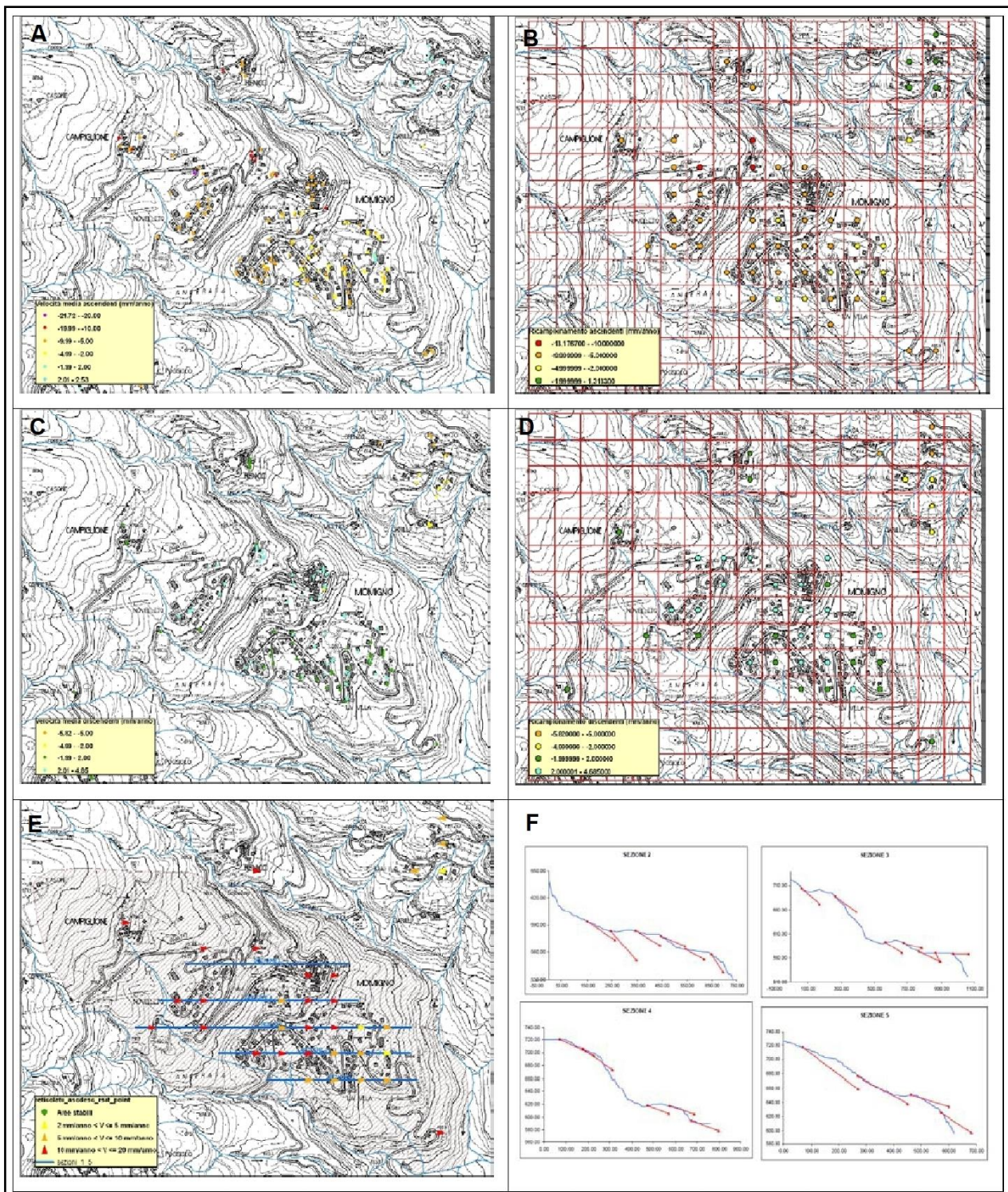


Figura 31 – Processo di ricostruzione del vettore spostamento nel piano EOZN per l’area di Momigno (PT). Per spiegazione vedi testo.

In Figura 31 sono mostrati i risultati ottenuti dall’analisi delle velocità medie rilevate dal satellite RADARSAT-1 nel periodo 2003-2007 con ricostruzione del vettore spostamento nel piano EOZN.

Il dataset ascendente registra movimenti diffusi con velocità negative (in allontanamento) variabili tra 2 e più di 20 mm/anno (Figura 31 A), mentre il dataset discendente è caratterizzato da valori positivi (in avvicinamento) variabili tra 2 e 5 mm/anno (Figura 31 C). Entrambi i dataset indicano quindi uno spostamento dell’area esaminata verso est, coerentemente con l’esposizione media del versante. La minore variabilità dei valori di velocità registrati in modalità discendente è probabilmente dovuta alla peggiore risoluzione delle immagini determinata dall’effetto di foreshortening.

Ovviamente dobbiamo sempre tenere presente che, in ogni caso, tali valori di velocità rappresentano solo la componente rilevabile lungo la LOS che, come visto al paragrafo 5.1, può risultare molto inferiore rispetto al valore reale.

Dopo questa prima analisi dei valori di velocità media annua registrati nelle due geometrie di acquisizione si è provveduto alla ricostruzione del vettore spostamento nel piano EOZN secondo i criteri illustrati al paragrafo 4.3. In Figura 31 B e 31 D è riportata la griglia di ricampionamento comune con maglia di 100 m utilizzata e i risultati ottenuti dal processo di generalizzazione rispettivamente per il dataset ascendente e discendente, mentre in Figura 31 E e 31 F sono visualizzati i vettori risultanti nel piano EOZN.

Il processo di ricostruzione del vettore EOZN indica, per tutte le celle considerate, uno spostamento del versante verso est con valori del modulo compresi tra 2 e 20 mm/anno (media 11 mm/anno) e inclinazioni rispetto allo zenit variabili tra 90° e 125° (media 105°).

In Figura 16F sono riportati alcune sezioni verticali del versante interessato dallo studio, tracciate lungo la linea di vista del satellite (vedi Figura 31 E), su cui sono riportati i vettori velocità ricostruiti. Come possiamo osservare, le direzioni dei vettori risultano mediamente parallele tra loro, indipendentemente dalla posizione che occupano lungo il versante, facendo pensare ad un movimento a prevalente carattere traslazionale.

Supponendo quindi che si tratti di un dissesto gravitativo con componente prevalente dello spostamento parallela alla linea di massima pendenza del versante, possiamo valutare la percentuale di movimento registrato lungo le LOS ascendente e discendente secondo le considerazioni svolte ai paragrafi 4.2 e 5.1. Ipotizzando quindi una esposizione media del versante pari a 120° ed una inclinazione di circa -20°, possiamo stimare, per il satellite RADARSAT-1 utilizzato in questa analisi, una percentuale di movimento rilevato lungo la LOS ascendente pari al 66% e lungo la LOS discendente pari al 23%. Questo spiega il fatto che il valore assoluto della velocità media rilevata lungo la LOS ascendente, pari a 9.27 mm/anno, risulti superiore a quello registrato lungo la LOS discendente, pari a 2.27 mm/anno. Ovviamente, una volta applicato il coefficiente correttivo necessario alle due velocità medie per riportarsi al 100% della stima, dovremmo ottenere due valori molto simili tra loro se le ipotesi di base sono corrette. Nel nostro caso, aumentando la velocità ascendente del 34% e la discendente del 67%, otteniamo rispettivamente un valore pari a 9.27 mm/anno e 9.87 mm/anno, con uno scarto di circa il 6% che giustifica le ipotesi sull'orientamento medio del vettore velocità.

Al fine di individuare eventuali settori a diverso grado di stabilità nell'area interessata dalla DGPV sono state delimitate le HDPSA secondo la procedura esposta al paragrafo 4.5. I risultati ottenuti sono riportati in Figura 32 A, dove è possibile vedere che, sempre in riferimento ai dataset ascendente e discendente del satellite RADARSAT-1 (2003-2007), tutte le aree individuate evidenziano HDPSA attive. L'unica eccezione riguarda una piccola zona posta ad est dell'abitato di Momigno, dove i PS registrati nelle due geometrie di acquisizione presentano velocità inferiori all'errore strumentale.

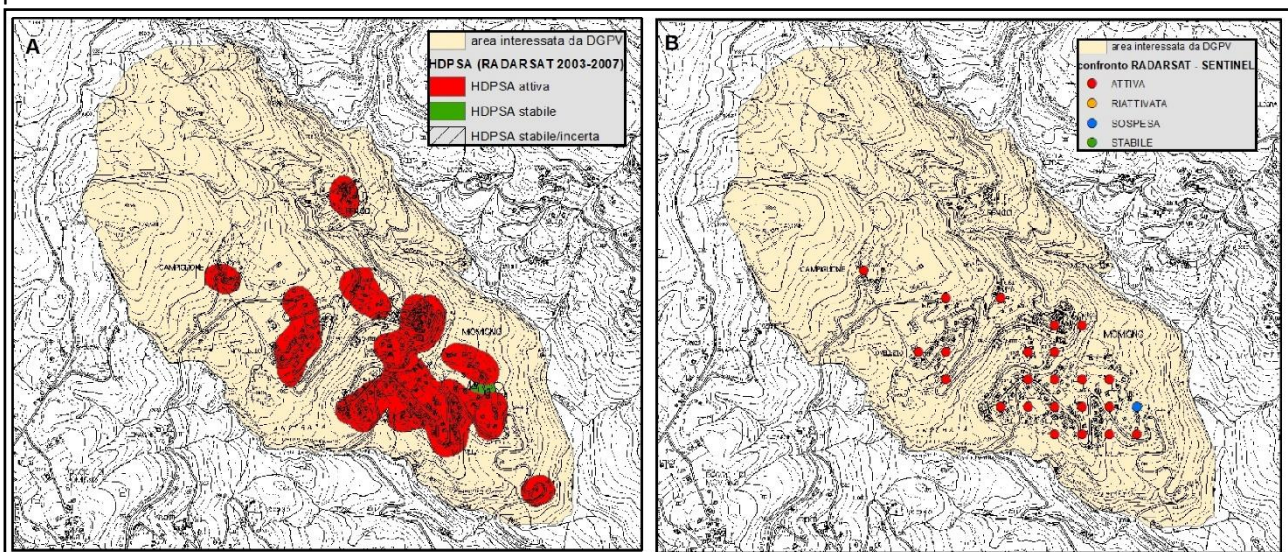


Figura 32 – Individuazione delle aree ad alta densità di PS (A) e attribuzione dello stato di attività (B) per l'area interessata da DGPV presso Momigno (PT)

Si è provveduto inoltre a valutare lo stato di attività del fenomeno secondo la procedura esposta al paragrafo 4.4, confrontando in particolare i PS ottenuti dall'elaborazione dei dati RADARSAT-1 nel periodo 2003-2007 con quelli derivati dall'elaborazione dei dati ENVISAT per il periodo 2014-2018. In questo caso il confronto non è stato effettuato sui singoli dataset ascendente e/o discendente, ma direttamente sui vettori velocità risultanti nel piano EOZN visti sopra. I risultati ottenuti sono riportati in Figura 32 B, dove è possibile verificare che per entrambi i satelliti i corrispondenti vettori EOZN risultano attivi, evidenziando uno strato attivo continuo su tutto il periodo di analisi.

L'analisi del coefficiente di correlazione lineare (CCL) tra coppie di PS all'interno dell'area interessata dalla DGPV ha mostrato un'ottima correlazione per tutte le coppie riguardanti il dataset ascendente (CCL medio = 0.86), mentre per il dataset discendente i CCL sono risultati molto bassi (CCL medio = 0.47), probabilmente in relazione all'effetto di foreshortening visto precedentemente. In Figura 33 è riportato il confronto tra le distribuzioni statistiche dei CCL per i due dataset ascendente e discendente.

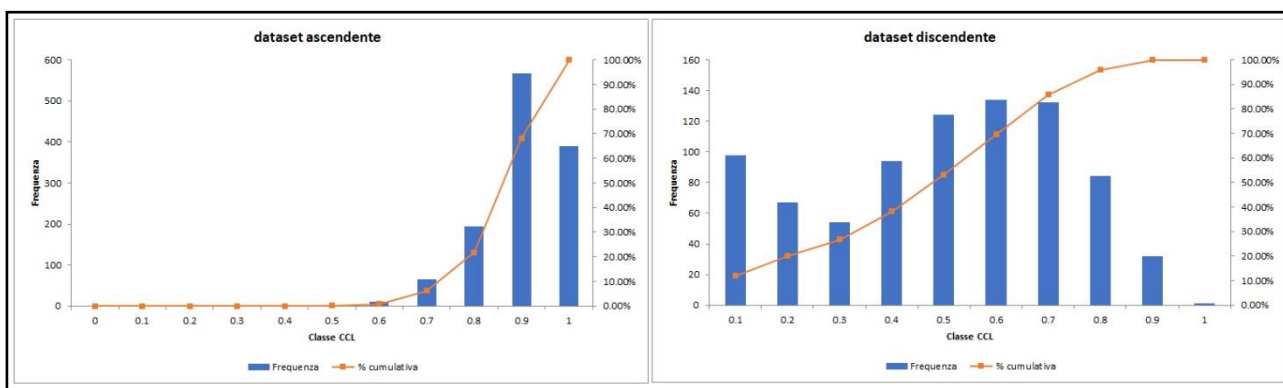


Figura 33 – Confronto tra le distribuzioni di frequenza dei coefficienti di correlazione lineare per i dataset ascendente (sinistra) e discendente (destra) nell'area interessata dalla DGPV

Come possiamo osservare, mentre per il dataset ascendente solo il 6% delle coppie di PS presenta un CCL minore di 0.7, per il dataset discendente il CCL inferiore a 0.7 riguarda l'86% delle possibili coppie.

Considerata l'ottima correlazione delle coppie di PS in geometria ascendente, si è provato a ricostruire una serie storica dell'andamento medio della deformazione sull'intera area interessata dalla DGPV per questa geometria di acquisizione (Figura 34).

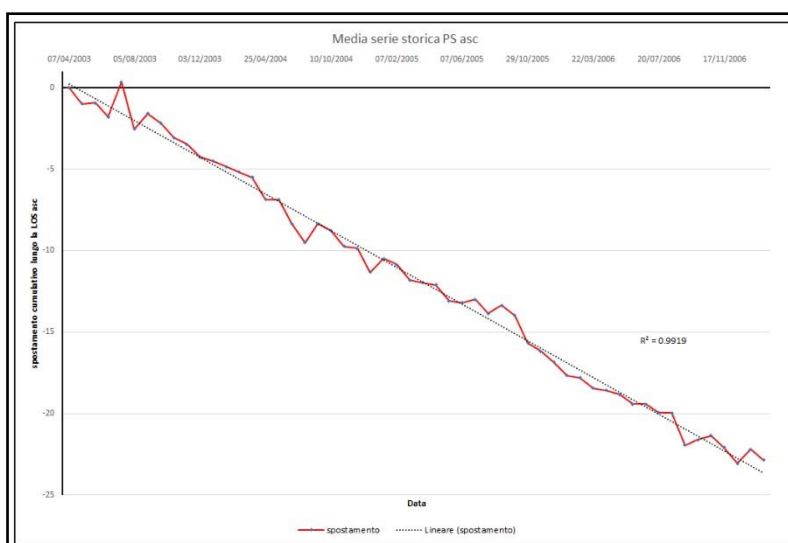


Figura 34 – Ricostruzione della serie storica degli spostamenti per l'area interessata da DGPV utilizzando il dataset ascendente

Si conferma un trend lineare degli spostamenti nel tempo con un coefficiente di correlazione molto prossimo a 1, con locali cambiamenti di trend che non sembrano essere riconducibili a variazioni nel regime pluviometrico.

6. Utilizzo dei dati interferometrici PSInSAR per l'analisi di fenomeni di subsidenza

Le considerazioni sulle velocità di deformazione fatte al paragrafo 2 rendono questa tecnica d'indagine molto utile all'analisi di fenomeni di subsidenza del terreno, caratterizzati generalmente da basse velocità di deformazione estese su lunghi periodi di tempo. Le zone soggette a subsidenza del terreno risultano inoltre generalmente localizzate in aree di pianura che, oltre ad essere esenti da fenomeni di foreshortening, layover e shadowing visti al paragrafo 1, risultano anche densamente coperte da elementi antropici capaci di riflettere stabilmente nel tempo la radiazione radar emessa dal satellite, con conseguente elevata densità spaziale di PS.

Inoltre, i fenomeni di subsidenza presentano un andamento delle deformazioni nel tempo con tendenza generalmente più lineare rispetto ai fenomeni gravitativi di versante e, di conseguenza, anche la stima della velocità media associata ai PS che, come accennato al paragrafo 4.1 corrisponde al coefficiente angolare della retta di regressione lineare degli spostamenti su tutto il periodo di analisi, risulta generalmente più affidabile. Analizzando i dati ENVISAT 2003-2010 nella pianura Firenze-Prato-Pistoia risulta infatti che, considerando i soli PS con velocità superiori all'errore strumentale, sia per il dataset ascendente che per quello discendente circa l'85% delle serie storiche degli spostamenti presenta un coefficiente di correlazione lineare superiore a 0.7.

6.1. Valutazione sugli spostamenti rilevati lungo la LOS

Come abbiamo visto, la LOS risulta abbastanza inclinata rispetto al Piano Orizzontale, permettendo così di rilevare meglio i movimenti con prevalente componente verticale, come nei casi di rigonfiamento o subsidenza del terreno. Ovviamente anche in questi casi il movimento reale risulta sottostimato dal satellite, ma in misura minore rispetto al caso di moto orizzontale.

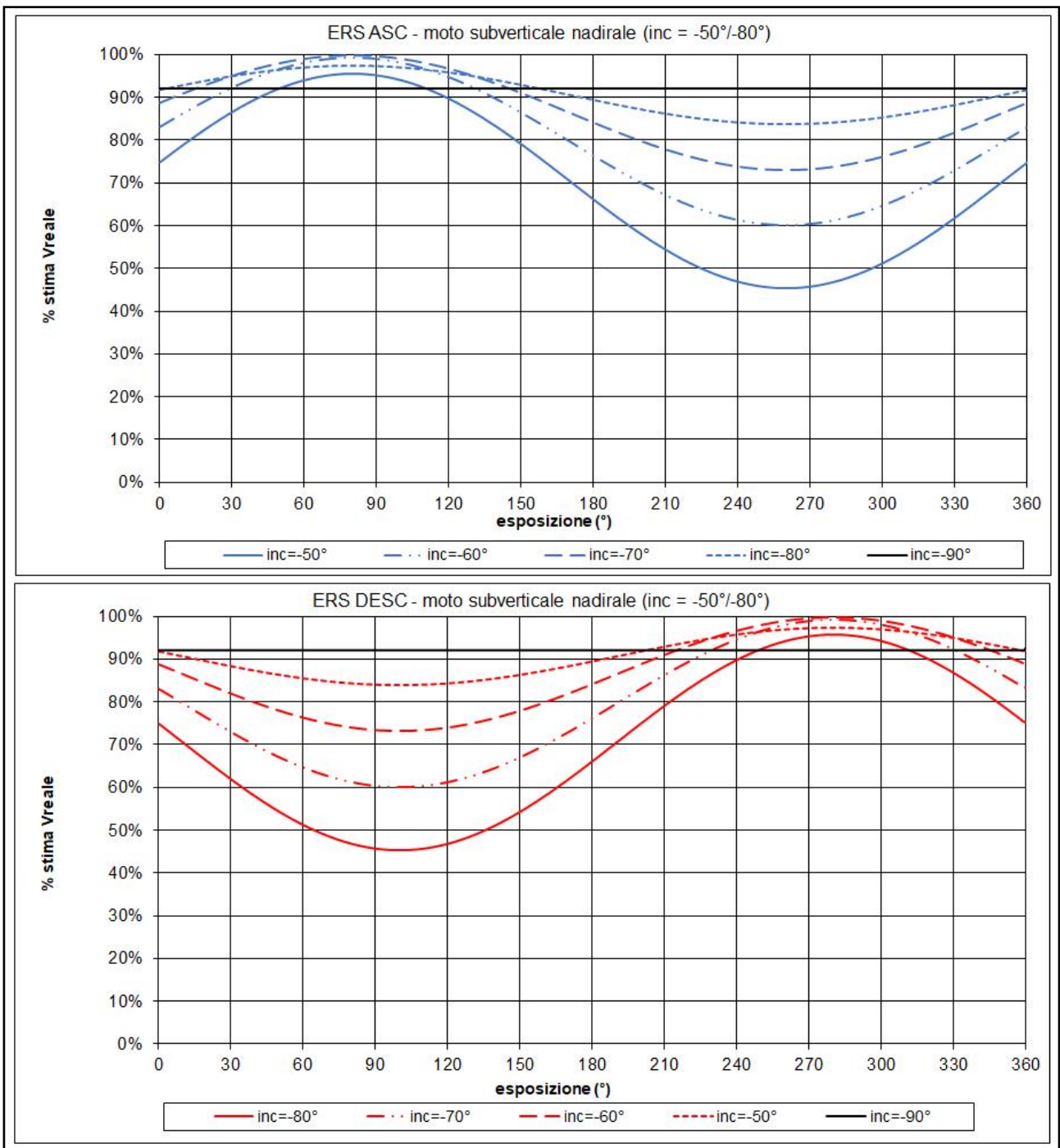


Figura 35 - Percentuale di movimento reale registrato lungo le LOS ascendente e discendente in funzione dell'orientamento del vettore Vreale espresso in termini di esposizione e inclinazione nel caso del satellite ERS

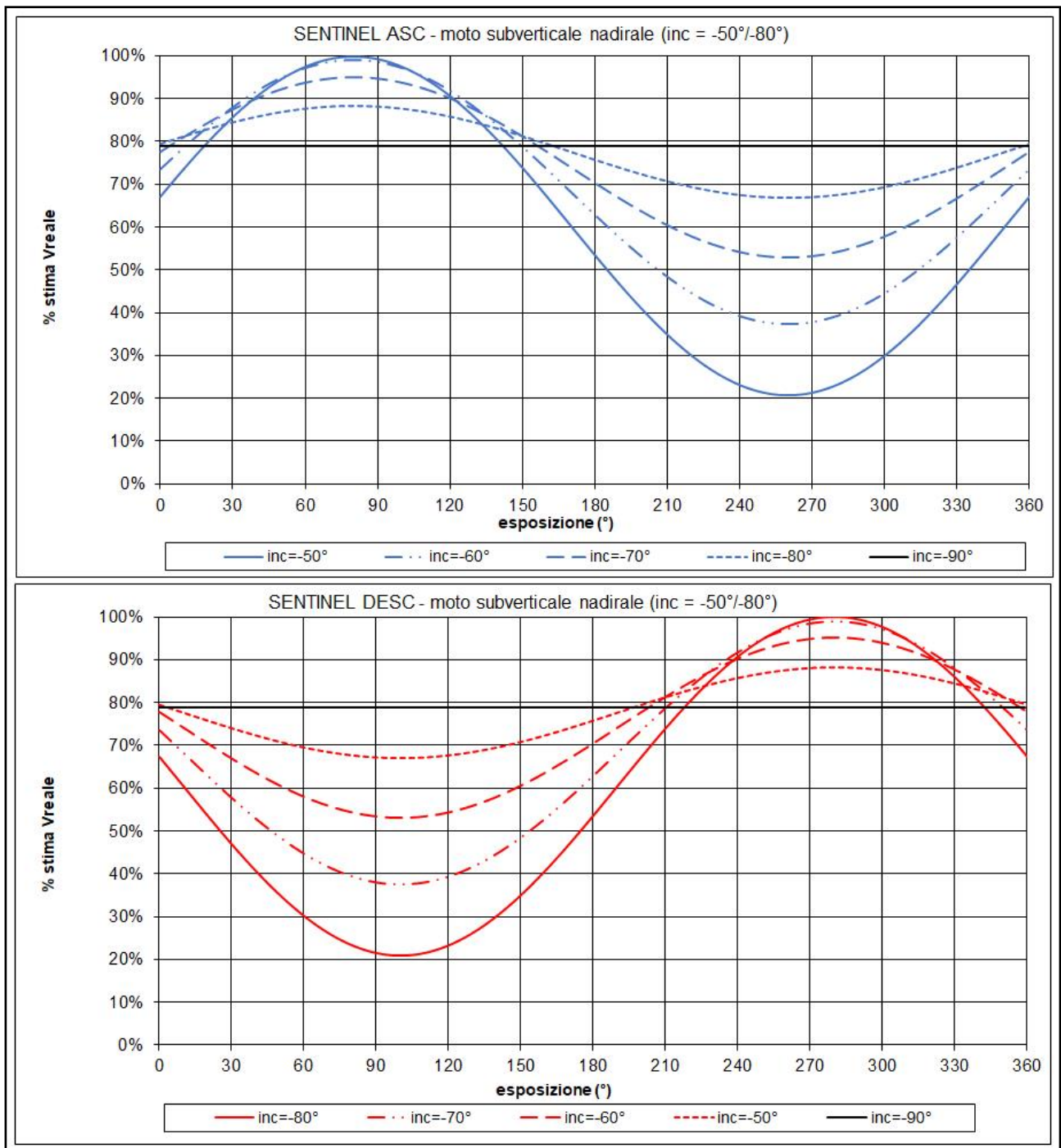


Figura 36 - Percentuale di movimento reale registrato lungo le LOS ascendente e discendente in funzione dell'orientamento del vettore Vreale espresso in termini di esposizione e inclinazione nel caso del satellite SENTINEL-1

Nei grafici di Figura 35 (ERS) e 36 (SENTINEL-1) vengono riportati, in funzione dell'orientamento del vettore velocità reale (Vreale) come definito al paragrafo 4.2, i valori percentuali di stima registrati lungo le LOS ascendente e discendente tenendo conto della direzione di spostamento reale dei satelliti (circa +/- 10°N). In particolare, trattando di moti a carattere prevalentemente verticale nadirale (fenomeni di subsidenza), vengono considerati solamente alcuni valori d'inclinazione variabili tra -50° e -90°. Ovviamente, trattandosi di moti che avvengono in aree pianeggianti, in valore di "esposizione" riportato nei grafici deve essere considerato unicamente ai fini dell'orientamento del vettore spostamento relativamente al piano orizzontale.

Nel caso del satellite ERS, l'elevata inclinazione sul PO della LOS (circa 67°) permette una buona risoluzione dei moti a prevalente carattere verticale, che ovviamente diminuisce al diminuire dell'inclinazione del vettore

(Vreale). Nel caso di moto puramente verticale (inclinazione = -90°) il valore registrato non dipende più dall'esposizione e risulta uguale al 92% del valore reale, mentre il valore del 100% si raggiunge quando il vettore (Vreale) si trova parallelo alla LOS ascendente o discendente. In ogni caso la percentuale di stima risulta sempre relativamente alta.

Il satellite SENTINEL-1 invece risolve peggio questo tipo di moto in seguito alla minore inclinazione sul PO della LOS (circa 52°). Nel caso di moto puramente verticale il valore registrato risulta uguale al 79% del valore reale, mentre il valore del 100% si raggiunge quando il vettore (Vreale) si trova parallelo alla LOS ascendente o discendente. Rispetto al satellite ERS, la distribuzione dei valori di stima del vettore (Vreale) risulta però più dilatata, permettendo di ottenere valori notevolmente più bassi in funzione dell'esposizione.

I grafici di Figura 35 e 36 ci aiutano a capire come, nell'analisi dei fenomeni di subsidenza, i valori registrati dal satellite possono avvicinarsi notevolmente ai valori reali.

6.2. Confronto tra dataset ascendente e discendente

L'importante componente verticale presente nei fenomeni di subsidenza o rigonfiamento del terreno, fa sì che i dataset ascendente e discendente di una stessa area presentino valori di velocità molto simili tra loro, sia come valore assoluto del modulo che come verso (segno). Infatti, sia che il satellite si trovi in geometria scendente o in geometria discendente, registrerà sempre un allontanamento dei singoli PS (velocità negative) nel caso di fenomeni di subsidenza, oppure un avvicinamento (velocità positive) nel caso di fenomeni di rigonfiamento.

Come abbiamo visto nel paragrafo 4.3, la ricostruzione del vettore spostamento ottenuta dall'analisi congiunta delle due geometrie di acquisizione porta ad individuare, nel caso di moti a prevalente componente verticale, angoli del vettore spostamento nel piano EOZN variabili tra 0° e 45° o tra 315° e 360° , nel caso di movimento verso lo zenit (fenomeni di rigonfiamento), oppure tra 135° e 225° , nel caso di movimento verso il nadir (fenomeni di subsidenza). Anche nel caso di moto verticale dobbiamo infatti tenere presente che i bersagli radar in superficie risponderanno in modo diverso alla deformazione, anche se è ragionevole supporre che la componente principale sia comunque verticale.

Nel grafico di Figura 37 è riportato il confronto tra le distribuzioni statistiche dei valori di velocità registrati nelle due geometrie di acquisizione per un'area soggetta a fenomeni di subsidenza del terreno. La direzione del movimento è prevalentemente verso il nadir, coerentemente con la natura del fenomeno osservato, il dataset ascendente presenta valori negativi con una media pari a $-3,9$ mm/anno e il dataset discendente presenta valori sempre negativi con simili parametri statistici. Questo esempio si riferisce ad un'area molto estesa, facente parte della pianura Firenze-Prato-Pistoia, per cui risulta una forte variabilità dei valori di velocità registrati.

Per avere un'idea più precisa dell'informazione ottenuta dall'esame congiunto dei due dataset nelle diverse zone della pianura, è possibile inoltre procedere alla ricostruzione del vettore spostamento nel piano EOZN, come descritto al paragrafo 4.3. In questo caso l'informazione ottenuta non ci permette peraltro di effettuare ulteriori valutazioni qualitative sulla natura del fenomeno, come invece accade nel caso di fenomeni franosi.

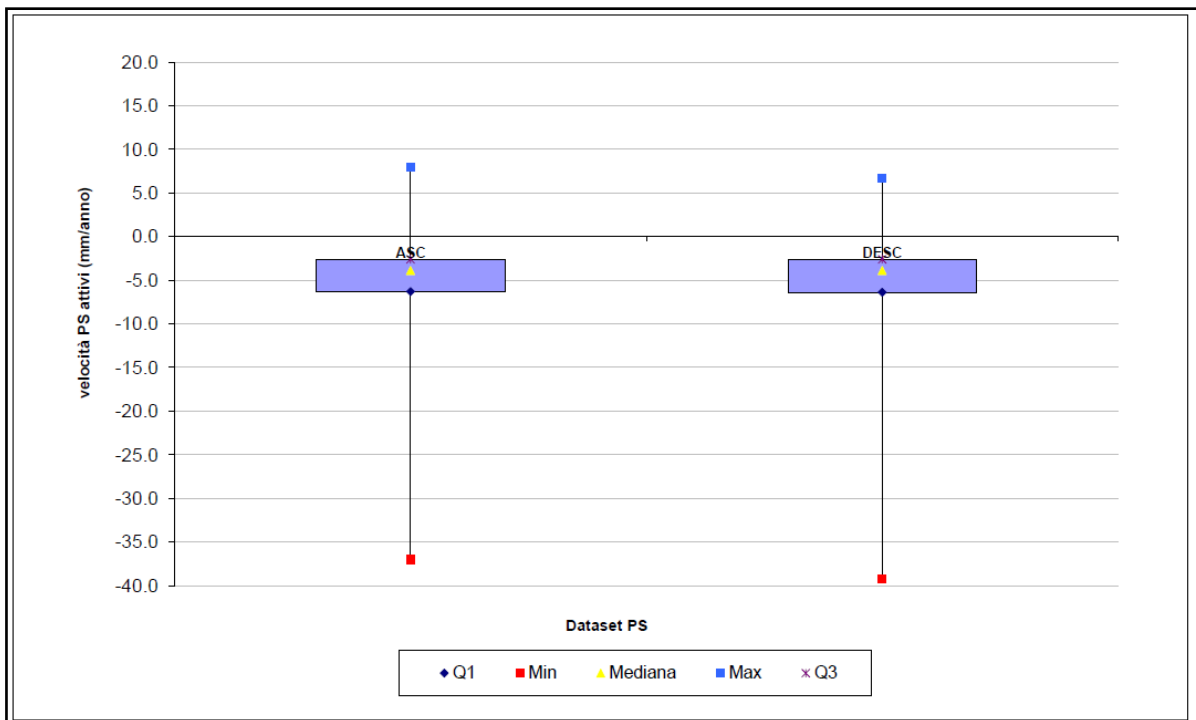


Figura 37 - Esempio di distribuzione statistica dei valori di velocità registrati in modalità ascendente e discendente per un'area interessata da fenomeni di subsidenza del terreno nella pianura Firenze-Prato-Pistoia (Q1=1° quartile, Min=minimo, Mediana=2° quartile, Max=massimo, Q3=terzo quartile)

In Figura 38 è mostrato l'orientamento del vettore EOZN nella pianura Firenze-Prato-Pistoia ottenuto utilizzando i dati ENVISAT relativi al periodo 2003-2010. In particolare, sono state considerate le celle di ricampionamento con maglia di 100 m contenenti PS con velocità media al di fuori dall'errore strumentale (± 2 mm/anno). Come possiamo vedere, la maggior parte dei valori ottenuti (93.7%) individuano movimenti verticali con componente nadirale (fenomeni di subsidenza, in rosso) e, subordinatamente (5.8%) movimenti sempre verticali ma con componente zenitale (fenomeni di rigonfiamento, in blu). Solamente lo 0.5% è invece riconducibile a movimenti a prevalente componente orizzontale verso est (in arancio) o verso ovest (in verde).

Le aree in subsidenza riguardano in particolare la pianura pistoiese, oggetto di numerosi prelievi di acque sotterranee sia per scopi agricoli che idropotabili, e alcune aree industriali della pianura fiorentina. Nell'area di Prato sono invece osservabili diffusi fenomeni di rigonfiamento del terreno che, seppur con velocità molto basse (circa 2.6 mm/anno), sembrano essere collegati alla risalita della falda nel periodo considerato conseguente la crisi dell'industria pratese a partire dai primi anni 2000 (Montini et al., 2012).

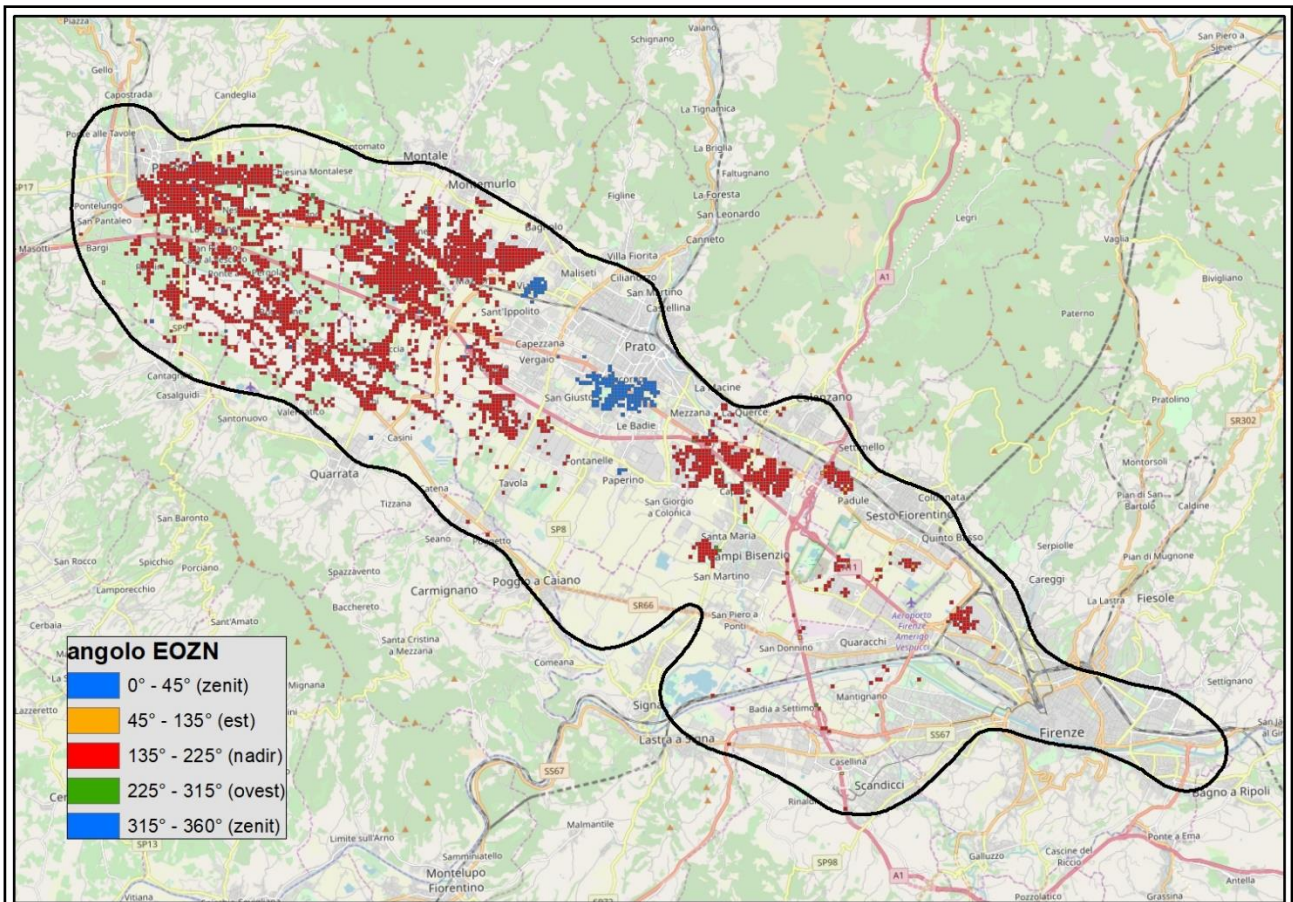


Figura 38 – Distribuzione spaziale delle classi di orientamento del vettore EOZN nella pianura Firenze-Prato-Pistoia relativamente ai dati ENVISAT (2003-2010)

6.3. Valutazioni sullo stato di attività

Come abbiamo visto al paragrafo 4.4 per i dissesti gravitativi di versante, il confronto tra velocità rilevate in periodi temporali diversi può risultare un utile elemento di supporto alla definizione dello stato di attività del fenomeno e quindi della sua pericolosità. Nel caso di fenomeni di subsidenza del terreno tale confronto può risultare molto utile anche per verificare l'evoluzione del fenomeno in seguito a variazioni dello stato dei prelievi idrici sotterranei dall'acquifero superficiale che generalmente costituiscono la principale causa scatenante.

In Figura 39 è mostrato, per l'acquifero alluvionale della pianura di Prato, il confronto tra i valori di velocità registrati in modalità discendente dal satellite ERS nel periodo 1992-2000 (Figura 39 a) e quelli registrati, sempre in modalità discendente, dal satellite ENVISAT nel periodo 2003-2010 (Figura 39 b). Il confronto tra i due set di dati (Figura 39 c) ha permesso di discriminare le aree dove la subsidenza risulta continua su entrambi i periodi di analisi, le aree dove si è verificato un arresto della subsidenza e quelle dove invece si è avuta una inversione di tendenza, con passaggio da fenomeni di abbassamento del terreno a evidenze di sollevamento.

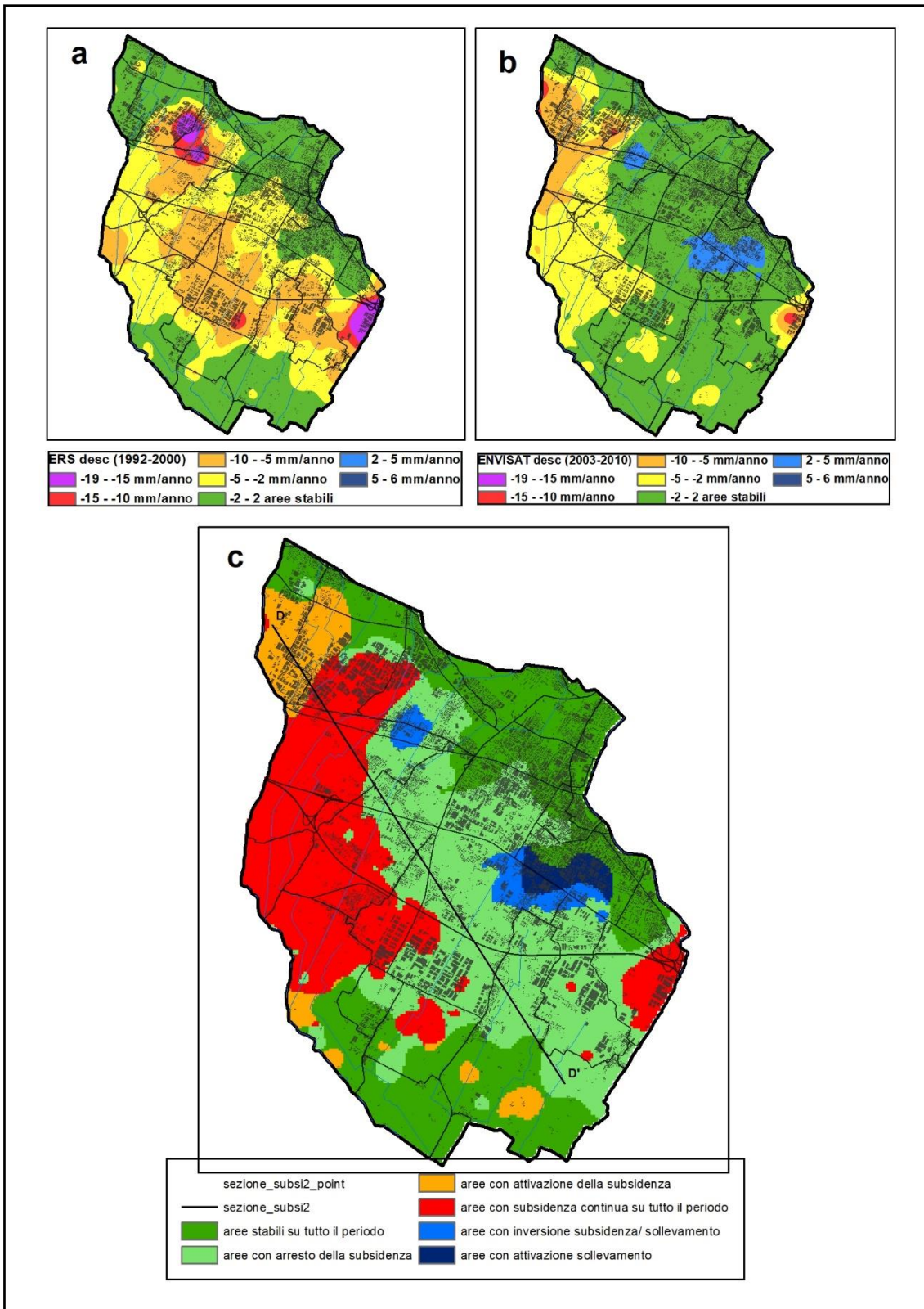


Figura 39 – Confronto tra valori di velocità registrati in modalità discendente dal satellite ERS (1992-2000) e dal satellite ENVISAT (2003-2010) per la pianura di Prato (PO)

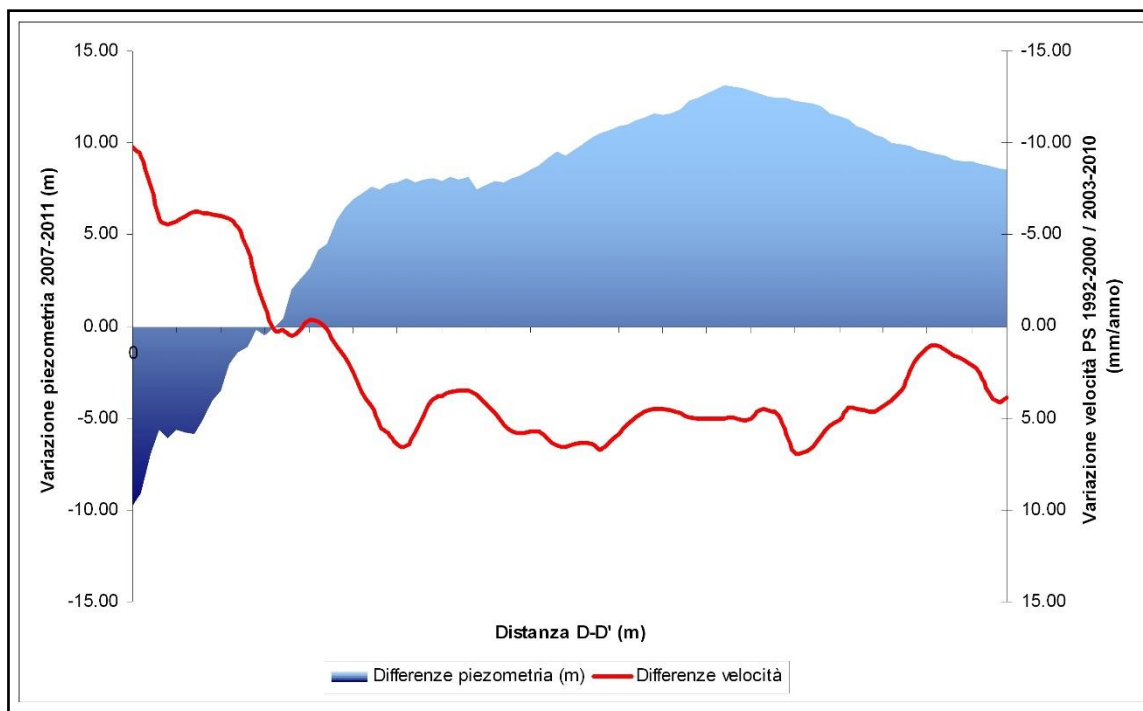


Figura 40 – confronto tra differenze di velocità e differenze di prelievi idrici nell’area di Prato (PO). Per spiegazione vedi testo

Questa analisi ha permesso di confrontare l’andamento spaziale e temporale delle deformazioni con quello dei prelievi idrici, in modo da verificare una eventuale relazione di causa-effetto tra i due fenomeni.

In Figura 40 viene effettuato un confronto, lungo la sezione DD’ di Figura 22c, tra le differenze di velocità media annua registrate nei periodi 2003-2010 e 1992-2000 e le differenze piezometriche registrate sulla stessa area tra dicembre 2010 e dicembre 2006. Come possiamo osservare, dove si sono verificati innalzamenti più o meno consistenti del livello piezometrico (differenze piezometriche negative), si ha una evidente diminuzione delle velocità di subsidenza (differenze di velocità positive), mentre dove si è registrato un ulteriore abbassamento della falda nel tempo (differenze piezometriche positive), le velocità di subsidenza tendono ad aumentare (differenze di velocità negative) a sottolineare l’accelerazione del movimento.

6.4. Analisi delle serie storiche degli spostamenti

Nel caso di fenomeni di subsidenza, le serie storiche degli spostamenti dei PS risultano generalmente più correlate tra loro sulla media distanza in quanto rappresentano per lo più movimenti spazialmente continui dove i valori di velocità variano gradualmente nelle diverse direzioni. La ricostruzione di serie storiche mediate degli spostamenti rilevati lungo le LOS tramite griglie di ricampionamento, vista al paragrafo 4.6, risulta pertanto molto più affidabile rispetto al caso di movimenti franosi, dove invece le velocità rilevate dai PS sono fortemente condizionate dalle variazioni topografiche locali.

L’analisi delle serie storiche degli spostamenti in aree subsidenti può risultare molto utile, specialmente se condotta sulla superficie di acquiferi porosi di origine alluvionale recente, per valutare l’impatto del regime dei prelievi sulla compattazione indotta dei sedimenti, oppure per verificare l’efficacia di politiche di controllo dei prelievi messe in atto per contrastare i fenomeni di subsidenza stessi. In tal senso, può essere utile verificare l’andamento degli spostamenti registrati dai PS nell’intorno di un determinato pozzo, o campo pozzi, di cui conosciamo l’andamento dei prelievi nel tempo.

Nel grafico di figura 41 sono riportati i risultati di un’analisi di questo tipo che si riferisce, in particolare, al confronto tra l’andamento degli spostamenti registrati dai PS nei pressi di un piezometro di monitoraggio, denominato “Badie”, ubicato in un campo pozzi ad uso acquedottistico nel Comune di Prato (Montini et al., 2012). Questo piezometro presenta una serie storica di misura del livello piezometrico estesa a tutto il periodo 1992-2010, rendendo così possibile il confronto delle variazioni piezometriche con le serie storiche degli spostamenti del terreno registrati prima dal satellite ERS (1992-2000) e poi dal satellite ENVISAT (2003-2010) con cadenza circa mensile. In particolare, i dati PS sono stati selezionati sia in funzione della distanza

dal piezometro esaminato (raggio 100 m) sia in base alla coerenza tra andamento degli spostamenti nelle corrispondenti serie di deformazione. In questo modo è stato possibile ricostruire una serie storica mediata del comportamento deformativo del terreno nei pressi del piezometro di riferimento.

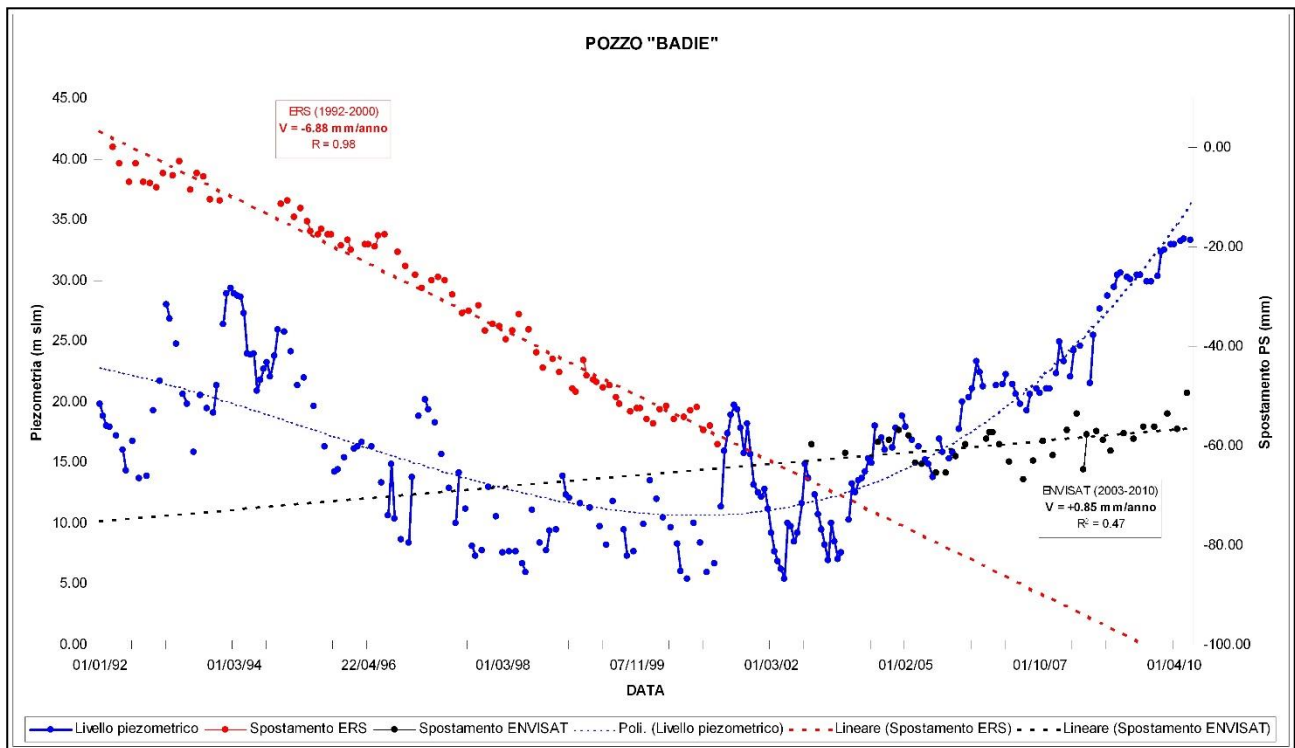


Figura 41 – confronto tra andamento del livello piezometrico (in blu), velocità di deformazione registrata dal satellite ERS (in rosso) e velocità di deformazione registrata dal satellite ENVISAT (in nero) per il pozzo “BADIE” nel periodo 1992-2010

Come possiamo osservare, l’andamento della superficie piezometrica mostra una evidente inversione di tendenza a partire dai primi anni 2000, passando da una situazione di graduale e continuo abbassamento ad una situazione di risalita o stabilizzazione.

Tale inversione di tendenza ha determinato un forte rallentamento delle velocità di subsidenza del terreno registrate dai satelliti nei pressi dei pozzi esaminati, portandosi da valori di circa -5/-10 mm/anno (LOS discendente) per il periodo 1992-2000 a valori rientranti nell’ambito dell’errore sperimentale (+/- 2 mm/anno) per il periodo 2003-2010.

Il trend di risalita della falda è probabilmente da imputare alla forte diminuzione dei prelievi di acque sotterranee a scopo industriale dovuta essenzialmente alla crisi dell’industria pratese verificatasi a partire dagli anni 2000, ma anche alle azioni di governance delle risorse idriche messe in atto (miglioramento dei processi industriali, politiche di disincentivazione all'utilizzo delle acque di falda ed incentivazione all'utilizzo delle acque di recupero per uso industriale, ecc).

In figura 42 è invece mostrato un altro esempio di utilizzo dei valori di spostamento riportati nelle serie storiche dei PS per il confronto tra densità di prelievo e tasso di abbassamento del terreno nel tempo.

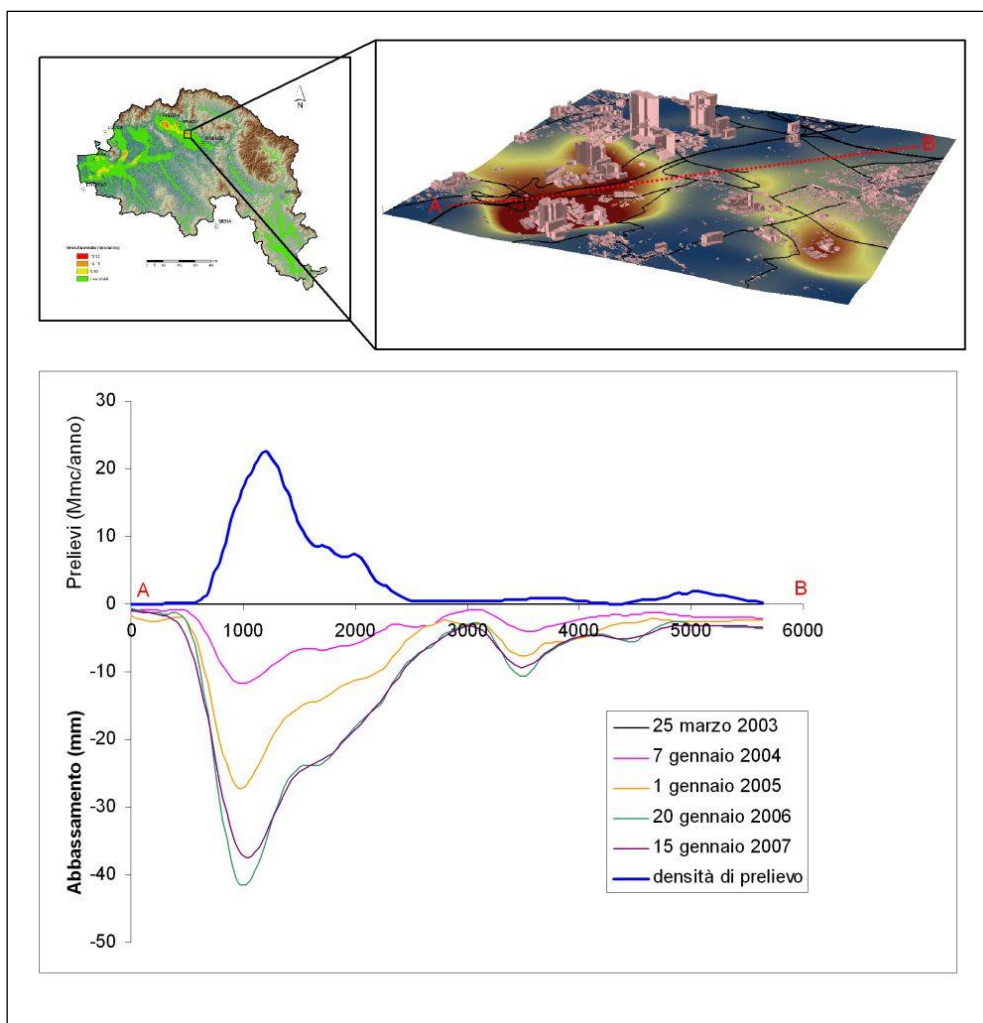


Figura 42 – Confronto tra andamento degli abbassamenti del terreno nell’area industriale di Capalle (FI) per il periodo 2003-2007 (dati RADARSAT-1) e densità di prelievo

In questo esempio, che si riferisce ad un’area industriale ubicata presso l’abitato di Capalle (FI), sono stati utilizzati i PS ottenuti dall’elaborazione interferometrica delle immagini RADARSAT-1 acquisite tra gennaio 2003 e gennaio 2007. Tale area risulta interessata da un forte sfruttamento idrico connesso all’attività industriale ed alla presenza di campi pozzi per uso acquedottistico, che hanno innescato fenomeni di abbassamento del terreno con conseguente insorgere di lesioni sui fabbricati esistenti.

In questo caso è stato deciso di considerare un solo valore annuale di abbassamento del terreno per ogni PS presente nell’area in esame, per poi procedere alla loro spazializzazione ed elaborare un modello digitale della subsidenza per alcune date di riferimento.

Nel grafico di figura 42 viene riportato il confronto, lungo la sezione AB, tra gli abbassamenti annuali del terreno e la densità di prelievo ricavata elaborando i dati forniti dal gestore del Servizio Idrico per quanto riguarda l’uso acquedottistico e dalla Provincia di Firenze per l’uso industriale. Da tale analisi risulta un graduale abbassamento del terreno nel tempo, che però evidenzia una inversione di tendenza durante il 2006 probabilmente da mettere in relazione agli effetti di riduzione dei prelievi. Come possiamo osservare risulta una forte corrispondenza tra densità di prelievo e tasso di abbassamento del terreno innescato dalla compattazione della matrice argilloso-limoso presente nei livelli acquiferi sfruttati.

6.5. Un esempio applicativo a scala regionale - Analisi dell’impatto della subsidenza sugli acquiferi alluvionali del bacino del fiume Arno

Lo scopo del lavoro è quello di mettere in relazione la distribuzione a scala regionale delle deformazioni superficiali ottenute da analisi interferometrica differenziale di immagini radar satellitari con lo stato di

sfruttamento delle risorse idriche sotterranee in acquiferi di tipo alluvionale. Sono stati utilizzati i dati puntuali di deformazione (PS) ottenuti dalle immagini radar acquisite dal satellite ENVISAT nel periodo 2003-2010 ed elaborati nell'Ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale del Ministero dell'Ambiente.

Il lavoro è stato strutturato effettuando un'analisi preliminare della distribuzione e tipologia delle deformazioni rilevate da satellite alla scala dell'intero bacino del fiume Arno, in modo da individuare le diverse tipologie di dissesti presenti sul territorio e stimarne i campi di velocità. Successivamente, le attività sono state focalizzate all'analisi dei fenomeni di subsidenza che interessano gli acquiferi superficiali ospitati nei sedimenti alluvionali e recenti (olocene) del fiume Arno e dei suoi principali affluenti. In particolare, sono stati considerati i 17 corpi idrici sotterranei significativi individuati nel Piano di Bacino del fiume Arno – Stralcio Bilancio Idrico e su di essi è stata effettuata un'analisi statistica dei valori di deformazione in funzione delle diverse categorie di uso del suolo, in modo da stimare in modo qualitativo l'impatto dei fenomeni di subsidenza sul territorio e la loro eventuale associazione a particolari attività antropiche. In base ai risultati ottenuti sono stati definiti tre indicatori capaci di fornire, a livello di ogni singolo acquifero, un quadro sintetico dell'estensione dei fenomeni di subsidenza osservati, del loro impatto sulle attività antropiche e dell'incidenza delle attività produttive sulla loro evoluzione.

Questa analisi ha permesso di individuare alcune criticità nel bacino del fiume Arno localizzabili in particolare nella pianura Firenze-Prato-Pistoia e nel Valdarno medio-inferiore, da mettere in relazione all'eccessivo prelievo di acque sotterranee in acquiferi con importante presenza di materiali limoso-argillosi ad elevata comprimibilità. I risultati ottenuti hanno evidenziato una buona corrispondenza con quanto osservato direttamente sul territorio, ponendo le basi per impostare dei criteri per la gestione sostenibile delle risorse idriche sotterranee alla scala regionale

6.5.1. Materiale utilizzato

L'analisi delle deformazioni superficiali è stata effettuata utilizzando PS ottenuti dall'analisi delle immagini radar acquisite dal satellite ENVISAT nel periodo 2003-2010 ed elaborate nell'ambito del PSTA (vedi paragrafo 3.1).

Il bacino del fiume Arno risulta coperto completamente, sia in geometria ascendente che discendente, dalle immagini acquisite dal satellite ENVISAT e la densità media dei PS su tutto il bacino risulta pari a circa 170 PS/kmq con valori fino a circa 1500 PS/kmq nelle aree maggiormente antropizzate.

L'analisi di dettaglio per la caratterizzazione dei fenomeni di subsidenza direttamente connessi allo sfruttamento di risorse idriche sotterranee, è stata effettuata prendendo come ambito geografico di riferimento i principali acquiferi di tipo alluvionale presenti nel bacino del fiume Arno e definiti nel dettaglio nel Piano di Bacino del fiume Arno – Stralcio Bilancio Idrico. Si tratta di 17 corpi idrici sotterranei a carattere sostanzialmente superficiale, con presenza sia di falde libere che in pressione, situati nei sedimenti alluvionali recenti ed attuali del fiume Arno e dei suoi principali affluenti (Olocene). Tali acquiferi risultano interessati da un intenso sfruttamento specialmente in corrispondenza dei principali centri urbani del bacino (Firenze, Prato, Pistoia, Arezzo e Pisa).

L'analisi stratigrafica di massima dei litotipi acquiferi, finalizzata in particolare a verificare la presenza di materiali compressibili a carattere limoso-argilloso necessari all'innescio di fenomeni di subsidenza, è stata effettuata utilizzando la Banca Dati Sottosuolo e Risorsa Idrica (BDSRI) realizzata dalla Regione Toscana in collaborazione con il consorzio LAMMA e con il centro di Geotecnologie dell'Università degli Studi di Siena. Si tratta della raccolta georeferenziata di una serie di dati riguardanti il sottosuolo e la risorsa idrica (pozzi e sondaggi) a cui possono essere associati dati stratigrafici, idrogeologici e risultati di prove in situ e in laboratorio. In particolare, questo database ha permesso di estrarre ed analizzare circa 4000 stratigrafie riguardanti gli acquiferi alluvionali oggetto di studio.

La stima qualitativa delle zone soggette a maggiore concentrazione di prelievi di acque sotterranee è stata effettuata utilizzando il layer "Densità di Prelievo" (DP) realizzato nell'ambito del Piano di Bacino del fiume Arno – Stralcio Bilancio Idrico (AdBArno, 2008). Si tratta di uno strato informativo di tipo raster dove ad ogni cella, con lato di 50 m, è associato il volume di acque sotterranee prelevato in un intorno di 500 m.

Per quanto riguarda infine l'uso del suolo, utilizzato come maschera di analisi per le elaborazioni statistiche sulle deformazioni alla scala del singolo acquifero, è stato utilizzato un layer vettoriale alla scala nominale 1:10000 realizzato dalla Regione Toscana sulla base di ortofoto AGEA del 2010 integrate con elementi

vettoriali della carta tecnica regionale. Considerate le finalità dello studio e la natura dei PS esaminati, i possibili utilizzi del suolo sono stati raggruppati in cinque categorie principali, di cui tre (zone residenziali, aree industriali-commerciali e reti stradali e ferroviarie) strettamente legate all'urbanizzazione del territorio e quindi ricche di bersagli radar permanenti (mediamente 1000 PS/kmq), e le altre due (aree agricole e aree naturali) fortemente carenti di elementi riflettenti stabili nel tempo (qualche decina di PS/kmq) e pertanto di più difficile caratterizzazione per quanto riguarda lo stato deformativo rilevabile da satellite.

6.5.2. Metodologia di analisi

Questo lavoro è stato strutturato impostando un'analisi preliminare delle deformazioni alla scala regionale, finalizzata alla definizione dell'ambito geografico di riferimento per i fenomeni di subsidenza, ed una successiva analisi di dettaglio a livello di singolo acquifero, mirata alla valutazione dell'impatto di questi fenomeni sul territorio. In relazione alle due diverse tipologie di analisi sono stati selezionati due diversi criteri di esame ed elaborazione dei dati satellitari.

L'analisi alla scala regionale è stata realizzata elaborando i dati PS acquisiti nelle due geometrie ascendente e discendente in modo da ricostruire il vettore spostamento nel piano verticale EOZN, così come descritto al paragrafo 4.3. In particolare, le operazioni di ricostruzione del vettore spostamento sono state realizzate secondo celle quadrate con lato di 100 m, assegnandovi il valore di velocità media annua e l'angolo di orientamento nel piano EOZN risultanti.

Questa operazione ha permesso di classificare il tipo di movimento di ogni cella come a carattere prevalentemente orizzontale (est +/- 45° oppure ovest +/- 45°) oppure a carattere prevalentemente verticale (zenit +/- 45° oppure nadir +/- 45°).

Per quanto riguarda invece l'analisi statistica delle deformazioni alla scala del singolo acquifero, si è preferito utilizzare il maggior numero di dati possibile, senza effettuare processi di ricampionamento o altro tipo di generalizzazione. Per tale motivo le elaborazioni sono state effettuate solamente su una geometria di acquisizione dei dati satellitari e, in particolare, considerati gli aspetti qualitativi dei due dataset, sulla geometria discendente. La scelta di utilizzare una sola geometria è giustificata dal fatto che l'analisi riguarda unicamente moti di subsidenza del terreno, caratterizzati quindi da una distribuzione molto simile nelle due geometrie oltre che da valori di velocità negativi (Figura 44).

Per ognuno dei 17 corpi idrici sotterranei esaminati è stata effettuata un'analisi statistica descrittiva dei valori di velocità registrati all'interno delle cinque categorie di uso del suolo considerate, che ha permesso di comprendere meglio l'impatto dei fenomeni di subsidenza sul territorio. Per ogni categoria di uso del suolo è stata inoltre definita la densità di PS, utile a valutare l'affidabilità dei risultati ottenuti, la percentuale di PS attivi (velocità inferiore a -2 mm/anno) rispetto ai PS totali e le rispettive velocità medie, utilizzati poi per la definizione della pressione da subsidenza sugli acquiferi considerati. Quest'ultima in particolare è stata valutata attraverso l'analisi di tre indicatori, definiti alla scala del singolo acquifero e capaci di fornire un quadro sintetico dell'estensione dei fenomeni analizzati, del loro impatto sulle attività antropiche e dell'incidenza delle attività produttive sulla loro evoluzione:

1) Indicatore di subsidenza diffusa

È definito come la velocità media di deformazione sull'intero corpo idrico ed è finalizzato a valutare se un acquifero nel suo complesso è soggetto a fenomeni di subsidenza spazialmente diffusi su tutto il territorio. Difatti, essendo un parametro di tendenza centrale, tende a livellare i valori di deformazione anomali alla scala locale ed evidenziare invece la presenza di valori anomali spazialmente distribuiti.

Tale indicatore può assumere, in particolare, le seguenti classi di valori:

Classe 1 (bassa): Velocità media ≥ -2 mm/anno

Classe 2 (media): Velocità media < -2 mm/anno; ≥ -5 mm/anno

Classe 3 (elevata): Velocità media ≤ -5 mm/anno

2) Indicatore di impatto della subsidenza sulle attività antropiche

È posto uguale alla percentuale di PS attivi in aree antropizzate ed è mirato a quantificare l'impatto dei fenomeni di subsidenza sulle attività antropiche presenti sul territorio. Infatti, maggiore è la percentuale di PS attivi rispetto a tutti i PS presenti in corrispondenza di attività antropiche (zone urbanizzate, aree

industriali-commerciali, rete stradale-ferroviaria) è maggiore saranno i possibili danni economici determinati dai fenomeni di subsidenza.

Tale indicatore può assumere, in particolare, le seguenti classi di valori:

Classe 1 (bassa): $\leq 10\%$

Classe 2 (media): $> 10\%; \leq 30\%$

Classe 3 (elevata): $> 30\%$

3) Indicatore di associazione subsidenza - attività produttive

È definito come il rapporto tra la velocità media dei PS attivi in aree industriali-commerciali e la velocità media dei PS attivi su tutto l'acquifero. Questo indicatore è mirato a indicare quanto le attività produttive e, in particolare, gli ingenti prelievi idrici ad esse associati, influiscono sui fenomeni di subsidenza locali. Infatti, maggiore è la velocità media dei PS attivi sulle aree industriali-commerciali rispetto alla velocità media dei PS attivi su tutto l'acquifero e più facilmente i fenomeni estremi risulteranno collocati proprio in corrispondenza di tali aree, con probabile relazione di causa-effetto.

Tale indicatore può assumere, in particolare, le seguenti classi di valori:

Classe 1 (bassa): < 1.05

Classe 2 (media): $\geq 1.05; \leq 1.15$

Classe 3 (elevata): ≥ 1.15

Per quanto riguarda infine l'analisi dei fattori predisponenti (spessore di materiali sensibili a variazioni del contenuto d'acqua) e dei fattori scatenanti (depressione piezometrica innescata dai prelievi), si è cercato di verificare una loro eventuale relazione con le velocità di subsidenza dei terreni interessati. Per quanto riguarda i dati stratigrafici, i vari litotipi sono stati riclassificati in due categorie, ovvero materiali prevalentemente granulari (sabbie, ghiaie) e materiali prevalentemente coesivi (limi, argille), in modo poi da calcolare, per ogni sondaggio esaminato, il rapporto tra le due tipologie. I risultati ottenuti sono stati poi confrontati con la velocità di subsidenza e la densità di prelievo rilevate in un'intorno significativo (500 m) dei sondaggi esaminati.

6.5.3. Risultati ottenuti

L'analisi alla scala di bacino della distribuzione del vettore EOZN ha permesso di discriminare le aree con prevalente componente verticale (subsidenza) da quelle con prevalente componente orizzontale (dissesti gravitativi di versante).

Dalla Figura 43 appare evidente che i moti verticali distribuiti in modo significativo nello spazio risultano collocati nelle aree di pianura e, in particolare, in corrispondenza dei sedimenti alluvionali attuali e recenti depositati dal fiume Arno e dai suoi principali affluenti. Questi sedimenti ospitano acquiferi superficiali anche molto importanti che risultano interessati da ingenti prelievi ad uso irriguo, industriale e acquedottistico.

Nel grafico di Figura 44 è riportato il confronto tra la distribuzione statistica dei valori di velocità superiori all'errore strumentale (± 2 mm/anno) registrati in geometria ascendente e discendente all'interno degli acquiferi esaminati, unitamente a quella della loro ricombinazione nel vettore EOZN. Come possiamo osservare, i valori di velocità acquisiti nelle due geometrie presentano una distribuzione molto simile e risultano per la quasi totalità di segno negativo, ovvero in allontanamento dal satellite, individuando chiaramente la presenza di moti di subsidenza del terreno. Tale andamento è confermato dal valore medio della direzione del vettore EOZN che risulta pari a 184° rispetto allo zenit.

Per quanto riguarda la distribuzione spaziale dei valori di velocità del vettore EOZN (Figura 45), possiamo vedere che i dati più anomali riguardano principalmente le aree delle pianure di Pistoia, Empoli, Pisa e Padule di Bientina, dove possono essere raggiunte deformazioni medie superiori ai 3 cm/anno.

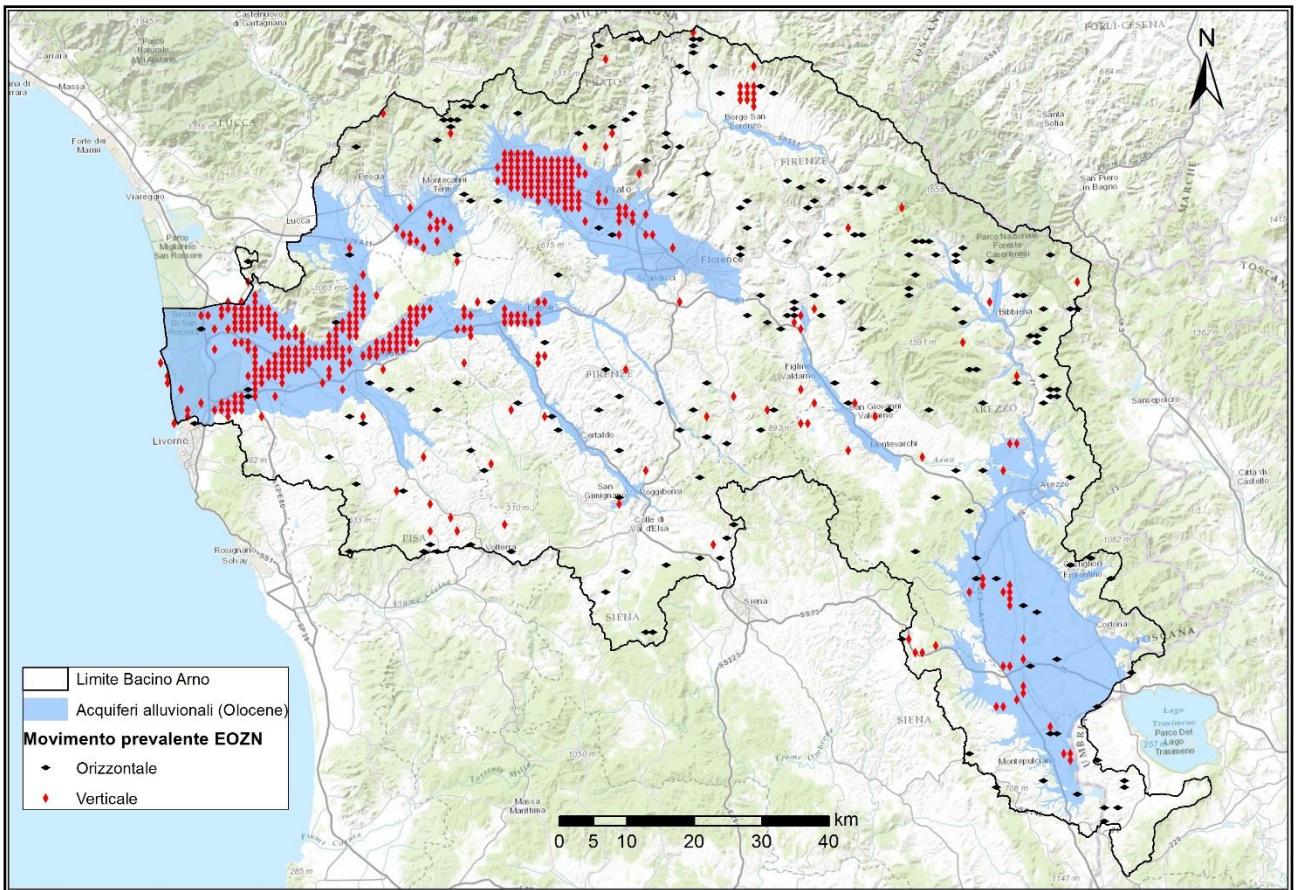


Figura 43 – Distribuzione spaziale del movimento prevalente nel piano EOZN (dati ENVISAT) nel bacino del fiume Arno

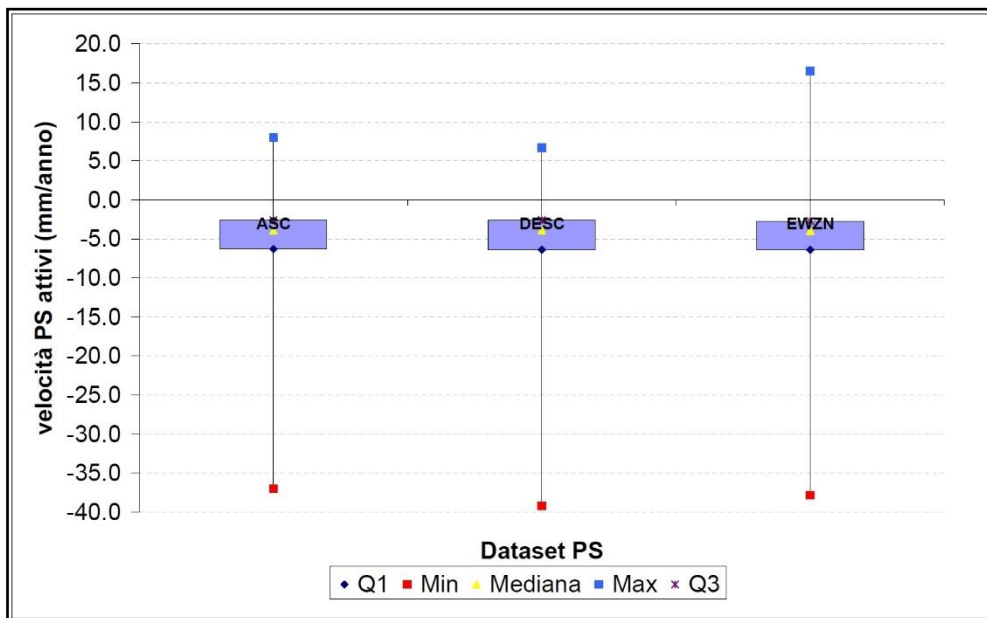


Figura 44 - Confronto tra la distribuzione statistica dei valori di velocità media annua dei PS ascendenti, discendenti e della loro ricombinazione nel vettore EOZN (dati ENVISAT). Q1=1° quartile, Min=minimo, Mediana=2° quartile, Max=massimo, Q3=terzo quartile

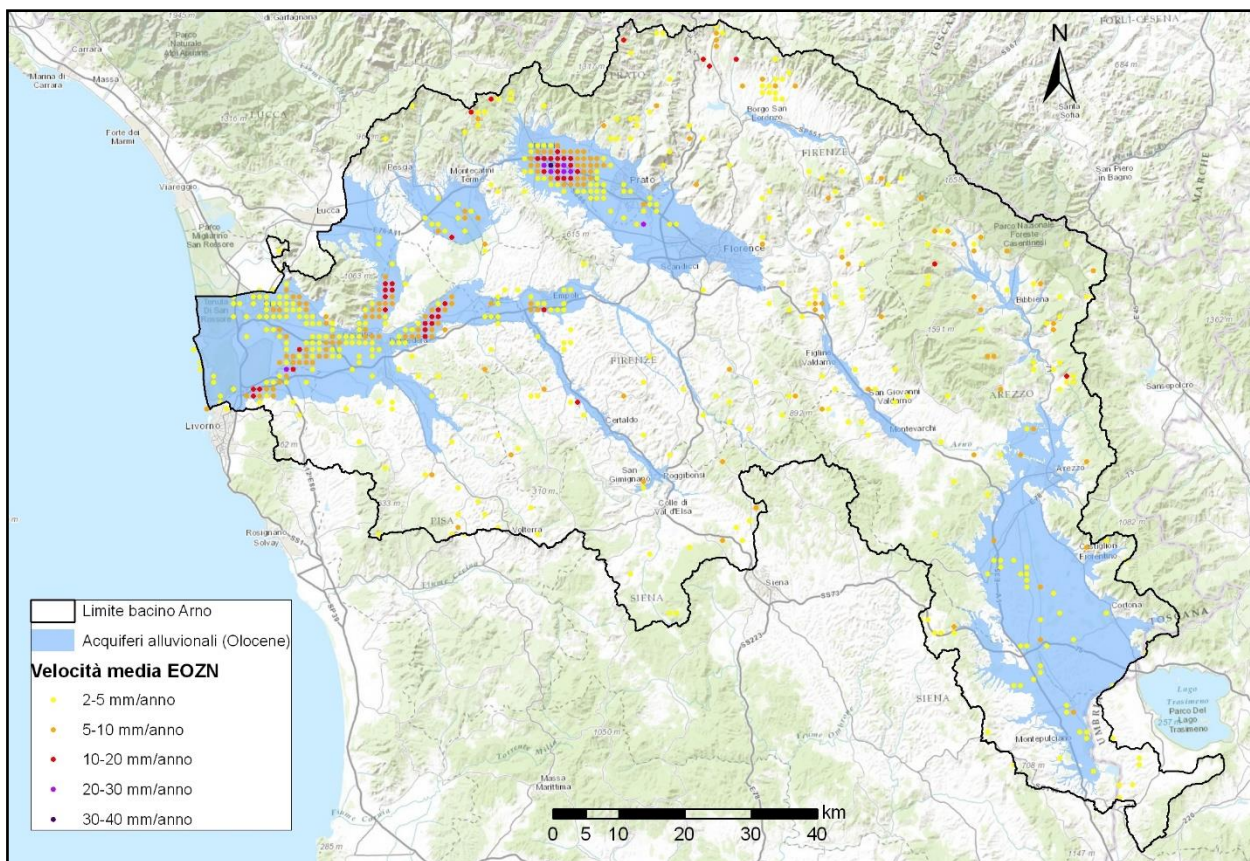


Figura 45 - Distribuzione spaziale delle classi di velocità media annua del vettore EOZN (dati ENVISAT) nel bacino del fiume Arno

L'analisi stratigrafica dei depositi interessati da queste deformazioni ha fatto emergere la costante presenza di materiali limoso-argillosi, sotto forma di lenti diffuse o come matrice dei litotipi acquiferi. Tali litotipi, considerata l'età relativamente recente e il contenuto in argilla, possono effettivamente rispondere anche in maniera significativa a variazioni del contenuto d'acqua, innescando fenomeni di compattazione del terreno in corrispondenza delle principali depressioni piezometriche o di arresto delle deformazioni in aree soggette a risalita della tavola d'acqua. Il confronto spaziale tra velocità medie di subsidenza, percentuale di materiali coesivi dei litotipi acquiferi e densità di prelievo di acque sotterranee, ha infatti messo in evidenza che le velocità di deformazione più elevate sono generalmente associate al sovrasfruttamento di acquiferi con importante presenza di materiali argilloso-limosi.

Per esaminare l'impatto dei fenomeni di subsidenza sul tessuto antropico e valutare la loro eventuale associazione a particolari attività presenti sul territorio, per ogni acquifero esaminato è stata effettuata un'analisi statistica delle velocità di deformazione emerse dai dati satellitari in relazione all'uso del suolo. In Figura 46 sono riportati alcuni dati riguardanti questa analisi (acquifero della pianura di Firenze), dove è possibile osservare, per ognuna delle cinque categorie di uso del suolo considerate, la superficie totale, la densità di PS, la percentuale di PS attivi e il confronto tra velocità medie dei PS attivi e dei PS totali. In questo esempio possiamo vedere che le velocità medie dei PS totali e la percentuale dei PS attivi nelle diverse categorie di uso del suolo si mantengono relativamente basse, facendo ipotizzare una sostanziale stabilità dell'area. D'altra parte, le elevate velocità medie raggiunte dai PS attivi in aree industriali e commerciali, unitamente alla loro elevata densità spaziale, evidenzia la presenza di fenomeni di subsidenza alla scala locale probabilmente connessi alle attività produttive.

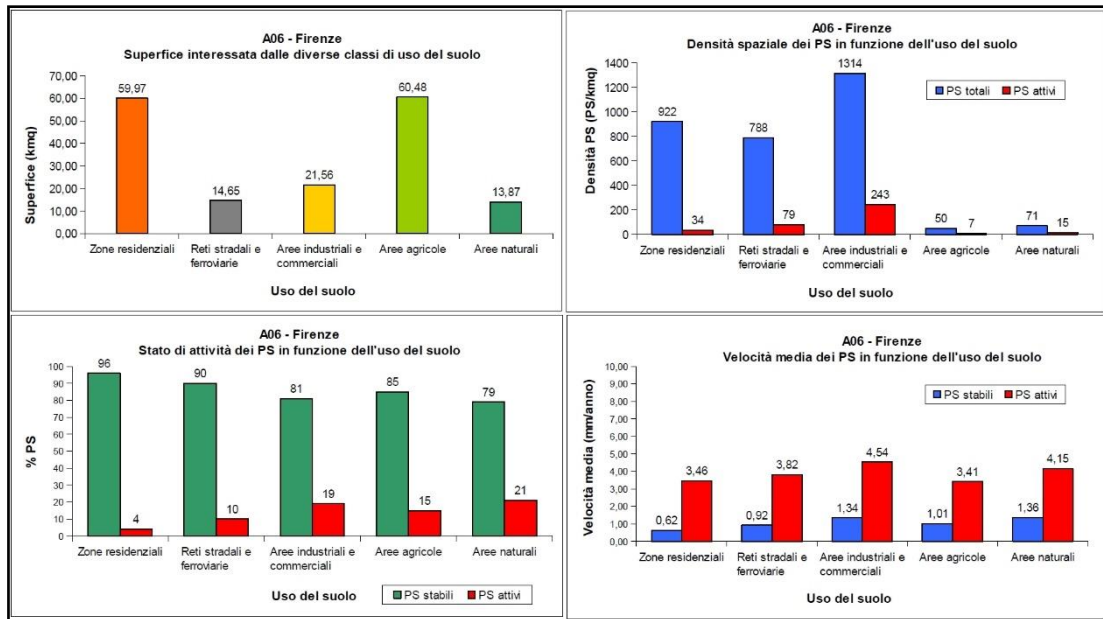


Figura 46 – Analisi statistica delle deformazioni in funzione dell’uso del suolo per l’acquifero alluvionale di Firenze. Per spiegazione vedi testo

In particolare, l’analisi dei tre indicatori visti precedentemente ha permesso di delineare un quadro sintetico dell’estensione ed impatto dei fenomeni di subsidenza osservati sul territorio. Nella Figura 47 sono riportati i valori assunti dai tre indicatori per ognuno degli acquiferi considerati, mentre in Figura 48 è possibile osservare la distribuzione spaziale delle rispettive classi definite al paragrafo precedente.

L’analisi ha consentito di verificare che gli acquiferi del Casentino, Valdarno superiore, Mugello, Pesa, Val di Nievole, Val d’Era e Lucca, non presentano particolari problemi di subsidenza. Questo non vuole dire che sono assenti deformazioni superiori all’errore strumentale, ma che tali deformazioni, se presenti, sono comunque di natura modesta e non comportano particolari problemi alle strutture antropiche presenti sul territorio.

Acquifero	COD	P1	P2	P3
Casentino	A01	0.87	4.60	0.95
Valdichiana	A02	1.24	11.50	1.07
Arezzo	A03	1.07	7.60	1.08
Valdarno superiore	A04	1.14	6.30	1.02
Mugello	A05	1.35	5.80	0.94
Firenze	A06	1.18	8.90	1.10
Prato	A07	2.00	28.20	1.13
Pistoia	A08	5.64	51.60	1.15
Pesa	A09	1.41	6.90	0.97
Empoli	A10	2.59	33.30	1.18
Valdinievole	A11	1.08	6.90	0.92
Elsa	A12	1.37	8.70	1.07
Santa Croce	A13	2.87	35.20	1.10
Val d' Era	A14	1.03	7.00	0.98
Lucca	A15	1.15	5.50	0.73
Bientina	A16	5.03	66.60	1.05
Pianura di Pisa	A17	2.60	43.10	1.14

P1 = Indicatore di subsidenza diffusa
 P2 = Indicatore di impatto della subsidenza sulle attività antropiche
 P3 = Indicatore di associazione subsidenza - attività produttive

Classe 1 (basso impatto)
 Classe 2 (medio impatto)
 Classe 3 (alto impatto)

Figura 47 – Valori assunti dagli indicatori di subsidenza negli acquiferi esaminati

Gli acquiferi della Val di Chiana, Arezzo, Firenze e Elsa, anche se non presentano fenomeni di subsidenza diffusamente distribuiti su tutto il territorio, risultano comunque interessati da fenomeni localizzati di entità variabile che, sebbene non interferiscano pesantemente sul tessuto antropico, sono da mettere probabilmente in relazione all’eccessivo utilizzo di acque sotterranee connesso alle attività produttive.

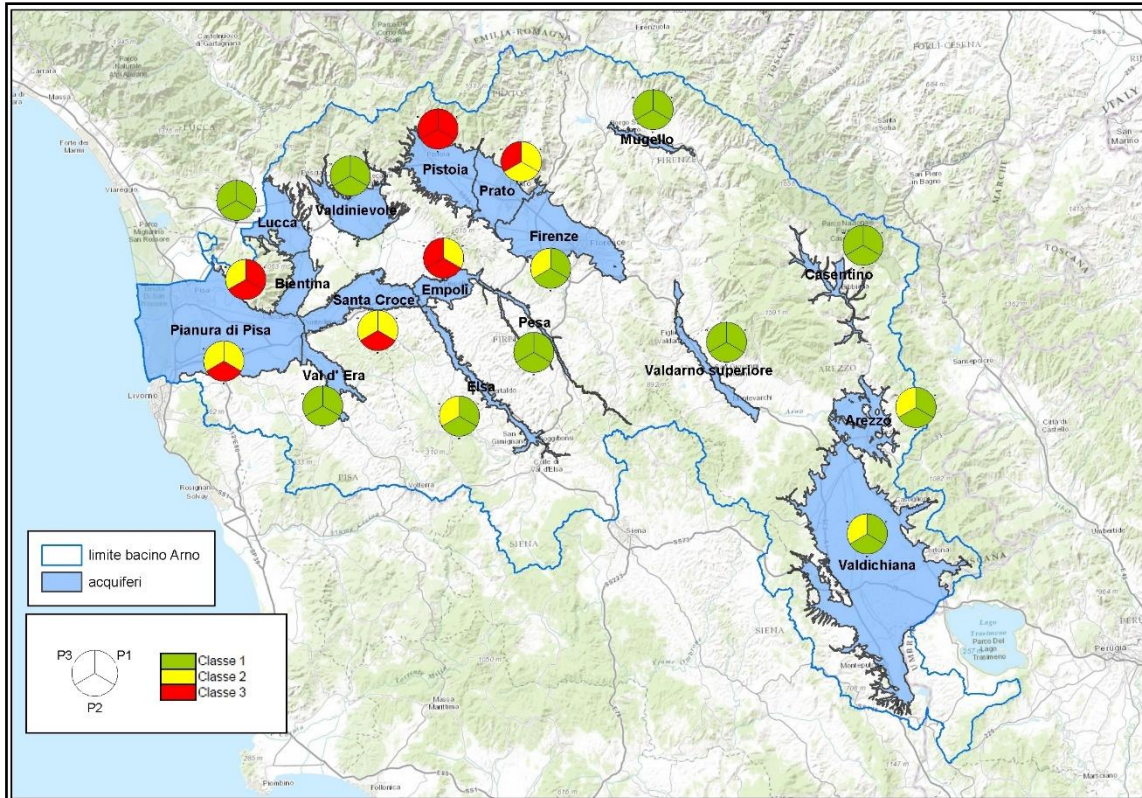


Figura 48 – Distribuzione dei valori assunti dalle tre classi degli indicatori di subsidenza considerati

Gli altri acquiferi (Prato, Pistoia, Empoli, Santa Croce, Bientina e Pianura di Pisa) sono invece chiaramente interessati da fenomeni di subsidenza diffusi su tutto il territorio che possono determinare importanti danni alle zone residenziali, commerciali, industriali e alle vie di comunicazioni, con particolare riferimento agli acquiferi della pianura di Pistoia e del Padule di Bientina. Su tutti questi acquiferi, risulta che i fenomeni di subsidenza più elevati sono collocati proprio in corrispondenza delle principali attività industriali-commerciali, facendo pensare ad un possibile collegamento con l'eccessivo prelievo di risorse idriche sotterranee ad uso industriale e acquedottistico.