

Dipartimento Protezione Civile



ReLUIS



IREA-CNR



**LINEE GUIDA PER L'UTILIZZO DEI DATI INTERFEROMETRICI
SATELLITARI AI FINI DELL'INTERPRETAZIONE DEL
COMPORTAMENTO STRUTTURALE DELLE COSTRUZIONI**

WP6 – Monitoraggio e dati satellitari

BOZZA – Agosto 2021

Versione 1 (Capitoli 1, 2, 3 e 4)

Sommario

1	INTRODUZIONE	4
1.1	PREMESSA	4
1.2	OGGETTO ED OBIETTIVI DEL DOCUMENTO.....	5
1.3	SVILUPPI FUTURI.....	6
2	NOZIONI FONDAMENTALI PER LA CORRETTA INTERPRETAZIONE DEL DATO INTERFEROMETRICO	9
2.1	PREMESSA	9
2.2	IMMAGINI RADAR SATELLITARI	10
2.3	SATELLITI E SENSORI DISPONIBILI	19
2.3.1	ERS-1/2 ed ENVISAT	20
2.3.2	Costellazione COSMO-SkyMed	20
2.3.3	Costellazione Sentinel-1	21
2.4	INTERFEROMETRIA SAR DIFFERENZIALE DA SATELLITE	21
2.5	PRINCIPALI TECNICHE DI INTERFEROMETRIA SAR MULTI-TEMPORALE	25
2.5.1	Tecnica PSInSAR™	26
2.5.2	Tecnica SBAS-DInSAR	27
2.5.3	Tecnica SqueeSAR™	28
2.5.4	Tecnica StaMPS	28
2.5.5	Tecnica TomoSAR	28
2.6	DATI RESTITUITI DALL'INTERFEROMETRIA SATELLITARE	29
2.6.1	Tipologia del dato fornito	29
2.6.2	Coerenza, definizioni e impatto sulla interpretazione	30
2.6.3	Distribuzione spaziale dei punti di misura	31
2.6.4	Precisione e accuratezza delle misure	32
2.7	STRUMENTI DIGITALI DI SUPPORTO ALL'INTERPRETAZIONE DEI DATI INTERFEROMETRICI	35
2.7.1	Prodotti cartografici da telerilevamento aereo e satellitare	35
2.7.2	Prodotti ottenuti da rilievi o telerilevamento in sito	40
2.8	RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE DEI DATI RESTITUITI DALL'INTERFEROMETRIA SATELLITARE	41
2.8.1	Rappresentazioni su diagrammi	41
2.8.2	Rappresentazioni su mappe	42
2.9	SINTESI DEL CAPITOLO E ASPETTI CHIAVE	44
2.10	RIFERIMENTI	45
3	ELABORAZIONE DEI RISULTATI DELL'INTERFEROMETRIA SATELLITARE NEL CAMPO DELLE COSTRUZIONI ESISTENTI	49
3.1	PREMESSA	49
3.2	UTILIZZO DEI DATI DI UN SINGOLO DATASET	50

3.3	UTILIZZO DEI DATI DEI DUE DATASET ASCENDENTE E DISCENDENTE	54
3.3.1	Ricampionamento temporale.....	57
3.3.2	Ricampionamento spaziale.....	58
3.4	TECNICHE DI INTERPOLAZIONE SPAZIALE.....	60
3.4.1	Metodi deterministici	61
3.4.2	Metodi stocastici.....	62
3.5	ELABORAZIONE DEI DATI NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA	64
3.5.1	Analisi nel dominio congiunto tempo-frequenza	67
3.5.2	Analisi di entropia spettrale.....	67
3.6	INTEGRAZIONE DEI DATI SAR CON RETI GNSS.....	70
3.7	ASPETTI E POSSIBILI CRITICITÀ IN FASE DI ELABORAZIONE DEI DATI.....	70
3.8	SINTESI DEL CAPITOLO E ASPETTI CHIAVE.....	72
3.9	RIFERIMENTI	74
4	INTERPRETAZIONE DEL COMPORTAMENTO STRUTTURALE ATTRAVERSO L'UTILIZZO DEI DATI SATELLITARI.....	76
4.1	PREMESSA.....	76
4.2	AZIONI E LORO EFFETTI SULLE COSTRUZIONI.....	76
4.2.1	Azioni legate all'interazione "attiva" terreno-struttura	76
4.2.2	Azioni indotte da movimenti del sottosuolo indipendenti dalla costruzione.....	79
4.2.3	Azioni delle acque	83
4.2.4	Azione sismica	84
4.2.5	Altre azioni sulle strutture	85
4.3	IL SUPPORTO DELLA RICOSTRUZIONE DELL'ASSETTO GEOLOGICO DEL SOTTOSUOLO PER L'UTILIZZO DEI DATI SATELLITARI.....	86
4.4	CRITICITÀ NELLA FASE DI INTERPRETAZIONE DEI DATI SATELLITARI.....	86
4.5	RIFERIMENTI	87
5	GRUPPO DI LAVORO.....	91

Nella versione definitiva del presente documento verranno inclusi i contributi di tutte le unità di ricerca coinvolte nel Progetto DPC-ReLUI5 2019-2021 – *WP6 Monitoraggio e Dati Satellitari*.

In particolare verranno inseriti capitoli relativi all'utilizzo dei dati satellitari per l'interpretazione del comportamento strutturale degli edifici ordinari e strategici in muratura ed in calcestruzzo armato, delle infrastrutture, degli edifici monumentali e delle aree archeologiche. Verranno inoltre inseriti casi studio specifici per ogni tipologia analizzata.

Infine verrà predisposta un'Appendice che descriverà in dettaglio la procedura SBAS-InsSAR applicata all'area studio di Roma.

1 INTRODUZIONE

1.1 PREMESSA

L'elevata vulnerabilità del patrimonio infrastrutturale, edilizio e monumentale italiano e l'esigenza di un maggior controllo della sicurezza di strutture e infrastrutture strategiche ubicate in zone potenzialmente sensibili, ha spinto la ricerca ad approfondire gli studi per la messa a punto di tecniche sempre più avanzate per il monitoraggio strutturale alle diverse scale, da quella territoriale fino a quella del singolo edificio o infrastruttura.

A questo riguardo, negli ultimi anni ha ricevuto molta attenzione la possibilità di utilizzare dati acquisibili da satelliti per il monitoraggio di fenomeni fisici a scala territoriale. L'utilizzo di immagini RADAR (*Radio Detection And Ranging*) satellitari, più specificatamente di immagini Radar ad Apertura Sintetica (*Synthetic Aperture Radar, SAR*), e di tecniche di interferometria differenziale (che utilizzano coppie di immagini, prima e dopo l'evento) ha anche fornito, a valle di eventi catastrofici quali ad esempio eventi sismici, misure di spostamenti su ampia scala che hanno consentito di ricostruire i movimenti della crosta terrestre e quindi di elaborare, sempre a scala territoriale, mappe di danneggiamento potenziale, utili alla Protezione Civile per la definizione delle azioni da intraprendere nelle prime fasi dell'emergenza sismica. Tecniche avanzate di interferometria differenziale (quali ad esempio le tecniche descritte al paragrafo 2.5) hanno anche consentito di superare i limiti dell'uso dei singoli interferogrammi, ottenendo storie di spostamento in lassi temporali della durata di anni e, quindi, le velocità medie degli spostamenti, che possono interessare ampie aree, anche costruite, o comunque sensibili.

Recentemente, grazie al numero crescente di satelliti, alla maggior risoluzione delle immagini radar, alla più elevata frequenza di campionamento data dal tempo di rivisitazione dei satelliti, ed al notevole sviluppo degli algoritmi e delle tecniche per l'elaborazione di tali immagini, le tecniche di monitoraggio satellitare sono sempre più spesso pensate come possibile supporto al monitoraggio nel campo delle infrastrutture e, in generale, del costruito. Al momento, le potenzialità di tali tecniche appaiono di sicuro interesse, anche se le modalità di elaborazione dei dati e di interpretazione degli stessi devono essere necessariamente molto diverse quando si passa dalla scala territoriale a quella della singola opera o manufatto. Sono infatti subito evidenti i vantaggi collegati alla disponibilità di dati di spostamento e di velocità media di spostamento (nel documento a volte indicati con un unico termine "deformazioni generalizzate") di aree ampie di territorio nelle quali sono collocate opere civili di interesse, senza presenza a terra di strumentazioni. Vanno però comunque precisati i limiti di tali misure in relazione all'esigenza di ottenere informazioni strutturali rilevanti.

Infine, la possibilità di utilizzare anche serie storiche precedenti (per tempi dell'ordine di una decina d'anni) consente di inserire le misure effettuate in un certo lasso di tempo in un quadro temporale molto più ampio, che può fornire informazioni anche su trend di spostamento stagionali o comunque ciclici che possono in molti casi essere del tutto naturali e non indicatori di effetti sulle strutture. In altri casi, invece, variazioni rispetto ai trend stagionali possono indicare fenomeni di danneggiamento in atto sulla struttura.

Al momento non sono sistematici i casi di applicazione delle tecniche di rilevamento satellitare al monitoraggio di strutture o infrastrutture civili, ma i primi risultati appaiono certamente significativi e meritano di essere oggetto di una specifica ricerca. Ovviamente, i dati ottenibili dal rilievo satellitare sono effettivamente utilizzabili per il monitoraggio di singole opere, se i punti di misura sono in numero e posizione tale da consentire una valutazione di spostamenti significativi per la struttura/infrastruttura di interesse, e se la precisione raggiungibile nel rilievo degli spostamenti è tale da consentire di valutare con sufficiente accuratezza spostamenti differenziali, che possono originare nella struttura/infrastruttura possibili danneggiamenti o comunque problemi di sicurezza. Da tenere presente che, poiché le misure di spostamento ottenute sono relative nello spazio (rispetto a un punto di riferimento scelto) e nel tempo (rispetto all'istante della prima immagine SAR utilizzata nella procedura interferometrica), gli spostamenti reali (con cui valutare ad esempio il livello di danno di una struttura) possono essere effettivamente stimati solo se le misure di spostamento sono integrate da misure on site.

Stante la frequenza del passaggio di un satellite su una specifica area (variabile da pochi giorni a qualche settimana, in base alla costellazione di satelliti utilizzata e all'intervallo temporale analizzato), deve essere anche evidenziato che possono essere colti gli effetti di fenomeni comunque di tipo lento, con movimenti che devono essere rapportati alla scala dei mesi o degli anni.

Non c'è dubbio che il rilievo di spostamenti in vari punti di una struttura/infrastruttura possa fornire informazioni molto utili per evidenziare possibili situazioni meritevoli di approfondimento, ma anche che, al fine di associare i movimenti rilevati a scenari di danno potenziale, è necessario, dunque, che siano disponibili informazioni sulle caratteristiche strutturali delle opere e indicazioni sulla relativa risposta alle azioni, anche con il supporto di modelli strutturali. Tale circostanza delinea chiaramente l'esigenza di integrazione e supporto alle misure di origine satellitare con misure tradizionali acquisite sul terreno (misure on site), siano esse di tipo topografico (ad esempio misure di spostamento utilizzando rilevatori *Global Navigation Satellite System* (GNSS) che consentono di aumentare significativamente la precisione degli spostamenti misurati con le tecniche avanzate di Interferometria Differenziale, ma anche misure a specifico carattere strutturale di tipo statico (mediante ad esempio inclinometri sulle infrastrutture da ponte), o di tipo dinamico (misure di tipo accelerometrico).

Le potenzialità derivanti dall'utilizzo integrato dei dati acquisiti direttamente sulle strutture monitorate con quelli acquisiti via satellite sono infatti rilevanti nel caso di strutture e infrastrutture sensibili ai movimenti. La capacità dei sistemi di monitoraggio basati su dati satellitari di operare con continuità, indipendentemente dalle condizioni atmosferiche, può garantire un controllo costante e accurato diventando, pertanto, un utile strumento per gli enti che svolgono funzioni di controllo degli edifici e delle infrastrutture. Grazie alla tecnologia SAR e l'utilizzo di dati ad elevata risoluzione spaziale ed alta frequenza di campionamento è, infatti, possibile tenere sotto osservazione movimenti alle diverse scale, da quelli a scala territoriale, quali ad esempio la subsidenza, i movimenti franosi, i cedimenti fondali, fino a movimenti a scala più piccola, quali movimenti di edifici che possono condurre a condizioni critiche tali da determinare situazioni di rischio.

Tale obiettivo pone problematiche molto diverse in funzione della tipologia di opera, sia essa un edificio, una infrastruttura, o un'area costruita, e dei tipi di parametri che devono essere controllati per evidenziare il raggiungimento di potenziali livelli di attenzione.

1.2 OGGETTO ED OBIETTIVI DEL DOCUMENTO

L'obiettivo principale del presente documento è quello di esaminare le potenzialità e i limiti dell'utilizzo di misure di spostamento derivate dall'interferometria satellitare come strumento utile ai fini di diagnostica e monitoraggio strutturale. A tale fine, il documento affronta sia gli aspetti relativi alle caratteristiche dei dati ottenuti da tecniche avanzate di interferometria differenziale satellitare, sia quelli relativi alla loro interpretazione in relazione all'impiego nell'ambito del monitoraggio strutturale, identificandone potenzialità e criticità. I contenuti delle presenti Linee Guida sono organizzati come segue.

Nel **Capitolo 2** viene presentata un'ampia panoramica sulle caratteristiche delle misure di spostamento ottenute mediante l'interferometria satellitare. In particolare, dopo un'introduzione sulle caratteristiche delle immagini radar satellitari e delle costellazioni di satelliti utilizzate per la loro acquisizione, vengono descritti i principi di base dell'interferometria radar satellitare, seguiti da una breve descrizione delle principali tecniche avanzate di analisi interferometrica per la ricostruzione delle serie temporali di spostamento degli oggetti a terra. Successivamente viene presentato un approfondimento sulla tipologia dei dati ottenuti a valle del processo interferometrico e sulle possibili modalità in cui possono essere visualizzati, rappresentati e analizzati, anche facendo uso di eventuali dati ancillari disponibili (ad esempio, prodotti cartografici o dati ottenuti da rilievo in sito). I contenuti presentati in questo capitolo hanno lo scopo di fornire le nozioni fondamentali per favorire un corretto utilizzo dei dati interferometrici, sia in termini di una loro successiva ulteriore elaborazione, sia ai fini del loro impiego per l'interpretazione del comportamento strutturale.

Il **Capitolo 3** presenta alcune delle principali tecniche e modalità di elaborazione che possono essere effettuate sui dati ottenuti dall'interferometria satellitare, al fine di ricavare le misure e le informazioni di maggior

interesse per le attività di diagnostica e monitoraggio strutturale. Particolare attenzione viene rivolta agli approcci per la determinazione delle componenti di spostamento e di velocità media di spostamento lungo le direzioni coordinate Est-Ovest e Verticale (mentre praticamente nessuna informazione è ottenibile per la componente orizzontale N-S, essendo il sensore molto poco sensibile alla misura della componente del moto in tale direzione), essenziali per una corretta interpretazione dei fenomeni deformativi osservati. A tale fine risulta necessario il ricorso a tecniche di ricampionamento spaziale e/o temporale dei dati interferometrici. Successivamente, vengono presentate alcune tra le principali tecniche di analisi del segnale per lo studio delle serie temporali di spostamento ottenute dall'interferometria. Tali approcci consentono di ricavare informazioni importanti, che risultano spesso rilevanti al fine di un'efficace interpretazione strutturale delle misure fornite. Il capitolo si conclude evidenziando alcune criticità e aspetti rilevanti che possono essere riscontrati in fase di elaborazione successiva dei dati interferometrici. Da sottolineare come la finalità dei **Capitoli 2 e 3** sia quella di fornire indicazioni ai non specialisti per un utilizzo consapevole dei risultati del processo di valutazione degli spostamenti interferometrici, processo particolarmente complesso, consentendo in questo modo una proficua interazione tra tecnici con diverse competenze.

Nel **Capitolo 4**, l'attenzione è rivolta ai concetti generali utili all'interpretazione dei risultati dell'interferometria ai fini del monitoraggio strutturale delle costruzioni esistenti. Gli effetti sulle costruzioni, in termini di spostamenti rilevabili mediante l'utilizzo dei dati interferometrici, vengono analizzati criticamente, anche in funzione delle differenti tipologie di azioni che possono costituire la causa. Successivamente vengono discussi gli aspetti e le criticità generali per la corretta interpretazione strutturale delle misure ottenute dall'interferometria satellitare, focalizzando l'attenzione su quelli comuni a tutte le tipologie di opere.

Le peculiarità relative ad ogni specifica tipologia strutturale vengono analizzate e discusse in dettaglio nei capitoli successivi. In particolare, il **Capitolo 5** è dedicato agli edifici in muratura, il **Capitolo 6** agli edifici in calcestruzzo armato e il **Capitolo 7** alle infrastrutture. Per ciascuna tipologia strutturale viene presentata una breve disamina delle applicazioni riportate nella letteratura tecnica e scientifica in cui i dati interferometrici sono stati utilizzati per il monitoraggio di opere appartenenti a tale tipologia. A seguito vengono discussi i principali danni che possono interessare le strutture appartenenti alla specifica tipologia strutturale ed i possibili approcci per la loro diagnosi mediante l'utilizzo delle misure interferometriche, anche combinate con dati ottenuti da monitoraggio tradizionale. Il **Capitolo 8**, dedicato alle opere di interesse storico-monumentale e alle aree archeologiche, riprende la stessa struttura dei tre capitoli precedenti riadattata alle peculiarità specifiche di tale categoria di opere comprendenti tipologie strutturali molto diverse tra loro.

Il **Capitolo 9** propone quindi una sintesi ordinata dei principali aspetti riguardanti l'utilizzo delle misure ricavate dall'interferometria satellitare ai fini del monitoraggio strutturale, individuando sia le potenzialità che i limiti della tecnica. Inoltre, allo scopo di favorire la comprensione delle problematiche connesse all'utilizzo di misure di origine satellitare, al **Capitolo 10** vengono esposti alcuni casi studio relativi a tipologie strutturali di interesse, evidenziando come gli obiettivi del monitoraggio e le valutazioni sulla sicurezza possono essere differenti, in funzione delle caratteristiche strutturali principali, delle condizioni al contorno e della eventuale disponibilità di misure in sito.

Infine, alcune considerazioni conclusive sono riportate al **Capitolo 11**, mentre l'**Appendice** del documento riassume le principali caratteristiche dei dati interferometrici utilizzati per lo svolgimento delle analisi e degli esempi riportati in questo volume.

1.3 SVILUPPI FUTURI

Il campo dell'elaborazione dei dati satellitari, della loro interpretazione ed utilizzo per il monitoraggio delle strutture è attualmente in grande evoluzione per la rilevanza che potrà avere in futuro nella gestione della sicurezza del territorio e delle opere dell'uomo, e la ricerca in questo campo si sta indirizzando in varie direzioni. A questo riguardo, Reluis ha attivato uno specifico gruppo di lavoro costituito da 17 unità di ricerca sul tema *WP6 – Monitoraggio e dati satellitari*, che sta approfondendo l'affidabilità di diverse tecniche di

elaborazione dei dati attualmente disponibili e la rilevanza dei dati acquisibili come supporto al monitoraggio di differenti tipologie di costruzioni.

Tra le direzioni attualmente di maggiore interesse si citano le seguenti.

Utilizzo di differenti tecniche di telerilevamento - Oltre alle tecniche interferometriche multitemporali utilizzabili per il monitoraggio di fenomeni deformativi superficiali, un'ulteriore possibilità è offerta dalle tecniche di telerilevamento satellitare che riguardano le misure di *change detection (optical imagery)*, che hanno l'obiettivo di monitorare le variazioni spaziali nei rapporti tra edifici, strutture e terreni. Ad esempio, tali misure possono essere utilizzate per identificare le variazioni del tessuto urbano dovute a interventi antropici (lavori nel sottosuolo, attività di origine criminale etc.) o a dissesti - e quindi monitorare le conseguenze di questi sugli edifici circostanti - ovvero per individuare e monitorare le strutture sepolte sotto la superficie (applicazioni particolarmente efficaci e in espansione di queste rilevazioni possono riguardare il monitoraggio delle aree archeologiche, così come, nelle fasi di emergenza post evento, per consentire la definizione di una cartografia speditiva mirata all'immediata organizzazione dei soccorsi).

Inoltre, si possono utilizzare dati meteorologici quali umidità e temperatura dell'aria e del suolo, livello delle particelle in sospensione, etc. Questi parametri possono infatti fornire utili elementi per la valutazione del degrado dei siti e per la programmazione di interventi di manutenzione.

Un possibile sviluppo della ricerca considera la possibilità di integrare tali tecniche con quelle interferometriche, al fine di combinare opportunamente dati complementari utilizzabili per una migliore comprensione del comportamento strutturale.

Definizione di soglie di potenziale allarme – L'osservazione continua nel tempo di vaste aree può consentire già oggi la valutazione delle deformazioni superficiali del territorio, fornendo agli enti preposti alla gestione del rischio, un nuovo valido strumento di prevenzione e controllo, particolarmente utile, ad esempio, nel caso di infrastrutture di grandi dimensioni anche non direttamente raggiungibili (e.g. viadotti, opere di sostegno di versanti, ma anche dighe). Come trattato nel presente documento, le tecniche satellitari presentano una grande potenzialità nel fornire informazioni utili anche per lo studio di opere situate in ambienti urbanizzati, compresi gli edifici di interesse strategico.

I sistemi di allerta precoce consistono, in sintesi, nel prevedere il raggiungimento di condizioni critiche di fenomeni già in atto, prevenire situazioni di danno e/o di disagio, anticipare specifici fenomeni potenzialmente dannosi e nell'implementare una serie di azioni di risposta atte ad affrontare, a seconda del caso, l'emergenza che si presenta. I dati e i prodotti forniti dai sistemi satellitari, opportunamente elaborati ed integrati con i dati ottenuti con tecniche di monitoraggio on-site, possono rappresentare, dunque, un valido e importante strumento per condurre studi sulle cause e sui fenomeni precursori dei disastri ambientali e per migliorare la capacità di monitoraggio e di valutazione dei danni nel caso di fenomeni quali frane, alluvioni, terremoti.

Risulterebbe a questo scopo di grande interesse poter disporre di valori di soglie predefinite di spostamento, o meglio ancora di spostamento differenziale, che consentano di attivare eventuali procedure di allarme o comunque di monitoraggio *on site* nel caso in cui tali valori vengano superati. Tali soglie devono essere calibrate in funzione della tipologia di struttura (tipologia costruttiva e materiale) e ciò sarà possibile nel prossimo futuro approfondendo, sia dal punto di vista sperimentale che numerico, quali livelli di spostamento possano essere specificamente correlati a danni di diversa entità.

Integrazione tra monitoraggio satellitare ed on site – Sono particolarmente promettenti tecniche e protocolli operativi per l'integrazione delle informazioni acquisite via satellite con quelle ricavate on-site con tecnologie di monitoraggio tradizionali non distruttive e a bassa invasività. Ciò al fine di consentire il monitoraggio in modo permanente dello stato di salute di strutture ed infrastrutture, nonché di beni di rilevanza culturale, programmare la manutenzione straordinaria e valutare eventuali danni o potenziali criticità nel caso di eventi eccezionali quali terremoti, movimenti franosi, dissesti causati da alluvioni, etc.

Ad esempio, tecniche di monitoraggio dinamico sono utilizzate per studiare l'evoluzione del danno strutturale che si traduce generalmente in una variazione delle caratteristiche dinamiche della struttura, quali i periodi propri, i fattori di smorzamento viscoso equivalente e le deformate modali. Analizzando opportunamente la variazione di tali caratteristiche è possibile stabilire se nel sistema sia presente un danneggiamento, valutarne l'entità e in molti casi localizzarlo.

Al tema del monitoraggio *on site* è dedicato uno specifico paragrafo del capitolo 9 del presente documento. La possibilità di integrare dati satellitari con dati ricavati direttamente da reti di monitoraggio installate su strutture e infrastrutture apre nuovi scenari per la corretta e più efficace gestione di eventuali emergenze dovute a fenomeni antropici e/o naturali. A titolo di esempio, con riferimento ai beni di interesse storico, i dati raccolti dai satelliti possono essere ulteriormente integrati con quelli presenti nella banca dati basata sui sistemi informativi del MIBAC (Carta del Rischio, Vincoli in Rete, ecc.) al fine di fornire utili informazioni per il monitoraggio e la manutenzione programmata del patrimonio culturale (palazzi, chiese, siti archeologici, oggetto questi oggigiorno di una particolare attenzione da parte della società).

B
O
N
Z
I
A

2 NOZIONI FONDAMENTALI PER LA CORRETTA INTERPRETAZIONE DEL DATO INTERFEROMETRICO

2.1 PREMESSA

La possibilità di rilevare gli spostamenti della superficie terrestre avvenuti a seguito di fenomeni deformativi lenti e di monitorare la loro evoluzione nel tempo, in qualunque ora del giorno e della notte e indipendentemente dalle condizioni atmosferiche, rappresenta uno strumento di fondamentale importanza a supporto delle attività di controllo e salvaguardia del territorio naturale e del costruito.

Negli ultimi decenni le tecniche di telerilevamento radar da satellite sono divenute sempre più consolidate ed utilizzate nell'ambito dell'Osservazione della Terra (OT), grazie alla capacità di osservare e studiare regioni anche molto estese della superficie terrestre attraverso la propagazione e l'interazione delle onde elettromagnetiche con oggetti posti anche a notevole distanza dall'osservatore, mediante l'utilizzo di sensori remoti. Il vantaggio indiscusso del telerilevamento, in particolare di quello satellitare, è principalmente legato alla capacità di effettuare osservazioni remote con elevata copertura spaziale (anche milioni di km²) e temporale (frequenze di rivisitazione dei sensori variano da poche ore fino a qualche settimana), con un irrilevante impatto ambientale e limitati costi di monitoraggio, se rapportati all'estensione dell'area analizzabile o al periodo di osservazione, rispetto ai metodi tradizionali *on site*. Inoltre, a differenza dei metodi *on site* che permettono di effettuare misure solo dopo la messa in posa dello strumento in un sito d'interesse, nel caso di sistemi di telerilevamento satellitare si ha la possibilità di sfruttare gli ingenti archivi di dati esistenti relativi ad una stessa scena a terra, collezionati in un intervallo di tempo di qualche anno, o comunque precedente al verificarsi di un dato evento, rendendo pertanto possibile la ricostruzione dell'evoluzione nel passato di un fenomeno sotto osservazione.

Nel panorama dei vari sensori satellitari operanti nelle diverse bande di frequenza dello spettro elettromagnetico, un ruolo di primaria importanza per l'OT è ricoperto dai sensori attivi Radar ad Apertura Sintetica (*Synthetic Aperture Radar*, SAR), un sensore alle microonde (lunghezze d'onda da 1cm a 1m) che permette di misurare il segnale elettromagnetico retrodiffuso (o *backscattered*) dalla superficie terrestre, dipendente sia dalla geometria di acquisizione sia dalle caratteristiche elettromagnetiche e geometriche della scena osservata, per ricavare immagini SAR ad alta risoluzione spaziale (da alcuni metri a qualche decina di centimetri). Il SAR trova largo impiego nelle applicazioni di telerilevamento, grazie al vantaggio di essere indipendente dalla presenza di una sorgente luminosa esterna e dalle condizioni meteorologiche, e proprio grazie a questa flessibilità, negli ultimi trent'anni si è avuta una notevole spinta verso uno sviluppo continuo di tecnologie basate sull'utilizzo di diverse immagini SAR acquisite in un certo intervallo di tempo per l'analisi delle deformazioni dell'ambiente naturale e antropizzato. Tra queste, nel presente capitolo, particolare attenzione è volta alla tecnica Interferometria SAR Differenziale (DInSAR) e ai suoi algoritmi multi-temporali, finalizzata all'analisi e al monitoraggio degli spostamenti del costruito, attraverso la generazione di mappe spazialmente dense di velocità media di spostamento e relative serie storiche di spostamento per ogni punto coerente e alla scala della singola infrastruttura o edificio, a partire da un gran numero di immagini collezionate su un'area di interesse in un arco temporale di diversi anni.

Il presente capitolo contiene una sintesi delle principali caratteristiche dei sistemi di telerilevamento SAR satellitari e delle tecniche multi-temporali di Interferometria SAR satellitare che consentono di rilevare, analizzare e monitorare nel tempo le deformazioni del suolo e delle strutture. L'obiettivo del capitolo è, pertanto, quello di fornire le nozioni fondamentali per un corretto utilizzo dei dati interferometrici, sia in termini di una loro successiva ulteriore elaborazione, sia ai fini del loro impiego per l'interpretazione del comportamento strutturale.

Inizialmente, viene presentato un breve excursus sulle caratteristiche delle immagini SAR e dei principali sensori e costellazioni SAR satellitari, sviluppati a partire dal 1992 dalle varie Agenzie Spaziali Europee e caratterizzati da diverse risoluzioni spaziali, lunghezze d'onda, tempi di rivisitazione, copertura spaziale. Successivamente, vengono illustrati i principi alla base dell'Interferometria SAR differenziale e vengono

descritte alcune delle principali tecniche multi-temporali DInSAR avanzate, finalizzate alla generazione di serie temporali di spostamento e di mappe di velocità media di spostamento. Infine, viene presentato un approfondimento sulla tipologia dei dati ottenuti a valle del processo interferometrico e sulle possibili modalità in cui possono essere visualizzati, rappresentati e analizzati, anche facendo uso di eventuali dati ancillari disponibili (ad esempio, prodotti cartografici o dati ottenuti da rilievo in sito).

2.2 IMMAGINI RADAR SATELLITARI

Il telerilevamento o *remote sensing* è definito come l'insieme di tutte le tecniche che permettono di osservare e studiare regioni della superficie terrestre attraverso l'interazione di onde elettromagnetiche con oggetti posti anche a notevole distanza dall'osservatore. Il vantaggio indiscusso del telerilevamento, che ne ha determinato il grande successo nel campo dell'OT, è principalmente legato alla capacità di effettuare osservazioni remote con elevata copertura sia spaziale (anche decine di migliaia di km²) sia temporale (frequenze di rivisitazione dei sensori da poche ore fino a decine di giorni). Questo determina un impatto ambientale praticamente nullo e limitati costi di monitoraggio, se rapportati all'estensione dell'area analizzabile o al periodo di osservazione, rispetto ai metodi tradizionali *on site*, che invece forniscono misure molto accurate ma richiedono un accesso diretto a luoghi, a volte di difficile raggiungimento per condizioni climatiche ed ambientali avverse (es. calotte polari, crateri vulcanici, aree in frana).

I sensori utilizzati nelle diverse tecniche di telerilevamento possono essere classificati in passivi o attivi in base al loro principio di funzionamento: i primi sfruttano la radiazione elettromagnetica naturale emessa dai corpi o quella irradiata dal sole e riflessa dagli stessi, in assenza di un trasmettitore del segnale; i sensori attivi, invece, sono dotati di un sistema trasmettente e uno ricevente (antenna) mediante i quali, con l'invio di un opportuno segnale, "illuminano" la zona di interesse e registrano le informazioni retrodiffuse dalla scena (Elachi, 1988). Tra i sensori di telerilevamento attivo, i più usati per il monitoraggio dei parametri bio-geofisici della superficie terrestre sono i sistemi RADAR (*Radio Detection And Ranging*) satellitari (Franceschetti e Lanari, 1999). Il radar è un sistema di telerilevamento attivo che lavora nel campo delle microonde (lunghezze d'onda che vanno tipicamente da 1 m a 1 mm, corrispondenti a frequenze da circa 300 MHz fino a 300 GHz), nel quale il segnale elettromagnetico viene emesso da un'antenna trasmettente ed illumina i vari bersagli della scena osservata; il segnale incidente viene in parte assorbito dall'area illuminata, in parte riflesso e per un'altra aliquota re-inviato verso il satellite (segnale retrodiffuso) dove viene registrato dall'antenna ricevente, come riportato schematicamente in Figura 2.1. Gli echi registrati dall'antenna ricevente verranno poi convertiti in formato digitale e trasformati successivamente, mediante una opportuna elaborazione, in un'immagine radar. La caratteristica principale di questi sensori è quella di essere indipendenti dalla presenza di altre sorgenti luminose, come ad esempio il Sole, quindi possono essere usati in qualunque ora del giorno e della notte; inoltre, sfruttando il campo di frequenze delle microonde, possono essere usati praticamente in qualunque condizione climatica, riducendo l'impatto delle nubi o della nebbia, permettendo così un monitoraggio continuo e totale, adatto a tracciare, ad esempio, mappe topografiche, rilevare la rugosità del terreno o misurare la deformazione del suolo (Franceschetti e Lanari, 1999).

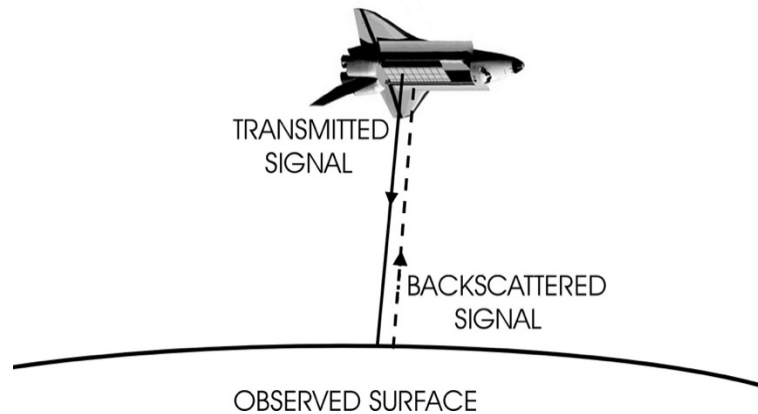


Figura 2.1 – Schema del principio di funzionamento di un sistema di telerilevamento attivo (Franceschetti e Lanari, 1999)

I sistemi satellitari radar più comunemente utilizzati per applicazioni di monitoraggio della superficie terrestre ruotano attorno alla Terra su un'orbita quasi polare (satelliti con orbite eliosincrone, definite come orbite geocentriche con valori di altezza e inclinazione tali da garantire che il satellite sorvoli lo stesso punto della superficie terrestre alla medesima ora solare locale) ad un'altitudine compresa tra 500 e 800 km sopra la superficie terrestre. Viaggiano su traiettorie leggermente inclinate rispetto ai meridiani (con angoli di pochi gradi), percorrendo metà dell'orbita dal polo nord al polo sud (orbita discendente) e metà dal polo sud al polo nord (orbita ascendente), Figura 2.2. Durante il volo lungo la loro orbita, i sensori radar montati sul satellite emettono segnali elettromagnetici lungo una direzione chiamata linea di vista del satellite (*line of sight, LOS*), all'interno una certa banda di frequenza e acquisiscono gli echi retrodiffusi, registrati come ritardi di tempo e, quindi, come distanze tra i punti a terra e il sensore. Tali informazioni vengono successivamente processate attraverso procedure che elaborano l'insieme degli echi digitali registrati, fino ad ottenere un'immagine della zona osservata. La combinazione del moto dei satelliti lungo la propria orbita con il moto rotatorio della Terra attorno al suo asse consente di ottenere immagini radar della stessa area in diversi istanti temporali. Il tempo impiegato dal satellite per ripassare sulla stessa area è chiamato "tempo di rivisitazione" (*Revisit Time, RT*).

Geometria ascendente



Geometria discendente



Figura 2.2 – Schema di acquisizione di immagini satellitari da orbite ascendenti e discendenti

I sistemi radar viaggiano lungo la direzione di volo (*flight direction*) e inviano segnali elettromagnetici che investono la superficie terrestre in una zona, denominata *footprint*, avente una determinata estensione nelle

due direzioni parallela e ortogonale alla linea di volo del satellite. In Figura 2.3 è riportato a titolo d'esempio lo schema della geometria di acquisizione di un satellite radar, che può essere riferito ad un sistema di coordinate cilindriche (x, r, θ) . In particolare, la coordinata x è chiamata *azimuth* – AZ, il cui asse coincide con la linea di volo del satellite, la quale forma un angolo ϕ (solitamente di pochi gradi, detto *heading angle*) con la direzione dei meridiani. La coordinata r è chiamata *slant range* (o semplicemente *range* – RG), e rappresenta la distanza tra il sensore e il punto a terra lungo la LOS, ossia lungo la direzione di puntamento del radar in cui vengono emessi e registrati i segnali elettromagnetici che incidono sugli oggetti (*target*) presenti nell'area illuminata. La terza coordinata θ , detta *off-nadir* o *look angle*, è l'angolo formato tra la verticale e la linea di vista, variabile a seconda del tipo di satellite e della modalità con cui opera (circa 23° per i sensori ERS, $15^\circ - 45^\circ$ per i sensori COSMO-SkyMed, si veda anche paragrafo 2.3). La caratteristica vista direzionale dei sistemi radar rispetto alla direzione di volo (*side-looking view*) consente di superare l'ambiguità destra/sinistra di possibili oggetti (*target*) che si trovano alla stessa distanza dal sensore (punti *equirange*) (Franceschetti e Lanari, 1999).

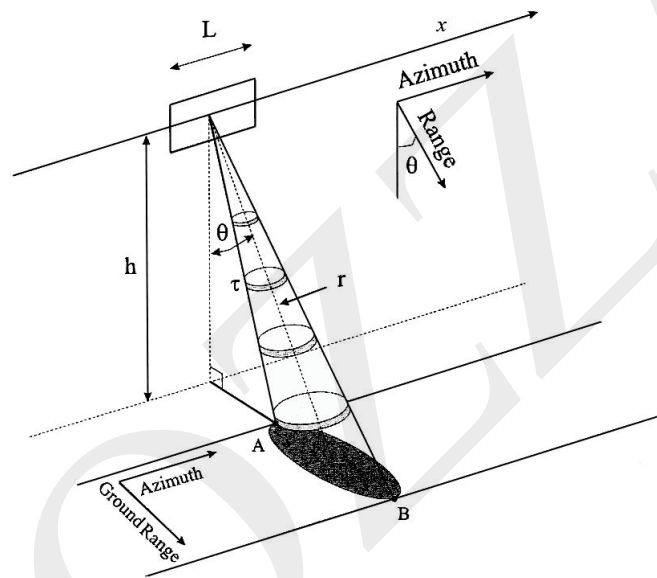


Figura 2.3 – Schema della geometria di acquisizione di un satellite radar (Usai, 2001)

La proiezione a terra della direzione *range* è denominata *ground range*, mentre il *footprint* è caratterizzato dalla dimensione detta *Swath Width* (ossia la distanza a terra tra i punti A e B, corrispondenti alle posizioni a terra in corrispondenza del *near-range* e *far-range*, rispettivamente, si veda Figura 2.3). In Figura 2.4 è mostrata una rappresentazione schematica di una sezione lungo la direzione di volo della geometria di acquisizione. È opportuno osservare che la scala adottata in Figura 2.4 deforma le reali proporzioni dell'angolo compreso tra la linea *far-range* e la linea *near-range*; la variazione di tale angolo, infatti, pur essendo direttamente legata all'estensione dell'area coperta nella reale configurazione di misura, può essere considerata sufficientemente piccola in alcuni casi tale da rendere rilevante il solo angolo θ valutato a centro scena (calcolato al *mid-range*) ai fini della descrizione del sistema.

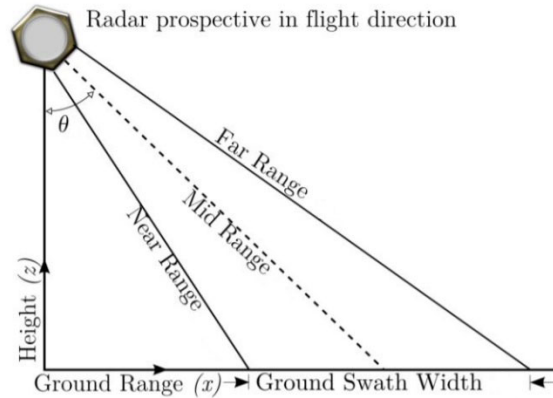


Figura 2.4 – Rappresentazione schematica della geometria di acquisizione side-looking del radar lungo il piano del range, ripresa e modificata da Velotto, 2016. Sezione ortogonale alla direzione di volo (azimuth) con l'indicazione del footprint a terra (ground swath width) e dell'angolo θ a centro scena. La variazione di θ tra near e far range è amplificata nello schema per ragioni di semplificazione nella descrizione.

A valle dell'elaborazione del dato rilevato dall'antenna e relativo ad una determinata area (tale operazione è talvolta denominata focalizzazione del dato grezzo (Franceschetti e Lanari, 1999) viene generata una immagine radar, costituita da pixel definiti nelle due direzioni *azimuth* e *slant range*, chiamate tipicamente coordinate radar.

Si definisce risoluzione in *range* Δr la minima distanza, misurata in *slant range*, che devono avere due oggetti a terra affinché il radar li possa vedere come distinti, quindi “risolti”, ed ha la seguente espressione:

$$\Delta r = c \cdot \frac{\tau}{2} \cong \frac{c}{2\Delta f} \quad (1)$$

È evidente dall'equazione (1) che la risoluzione in *range* dipende dalla velocità della luce c e dalla durata dell'impulso τ , dove il fattore 2 tiene conto del percorso di andata e ritorno dell'onda elettromagnetica. A sua volta, la durata dell'impulso può essere espressa come l'inverso della banda del segnale elettromagnetico Δf . Per ottenere alti valori di risoluzione in *range* è necessario, perciò, un segnale ad ampia banda, che si traduce in un impulso di breve durata. D'altro canto, poiché durante la propagazione il segnale elettromagnetico è soggetto a fenomeni di attenuazione, deve poter essere trasmesso con una significativa potenza ottenibile attraverso impulsi di durata non troppo limitata. La necessità di avere quindi al contempo un impulso con ampia banda, per migliorare la risoluzione, e di durata non troppo limitata, in grado di fornire una significativa potenza, conduce all'utilizzo, nei sistemi radar per telerilevamento, di impulsi elettromagnetici modulati in frequenza, ad esempio, utilizzo del *chirp* (segnale nel quale la frequenza varia linearmente con il tempo), che permettono di avere ampie bande e durate sufficientemente estese (Franceschetti e Lanari, 1999).

Similarmente al caso del *range*, due punti sono considerati distinti in *azimuth* se non si trovano entrambi all'interno del fascio d'antenna (*beam*). La risoluzione in *azimuth* Δx è legata, perciò, alla larghezza del fascio d'antenna, attraverso questa espressione:

$$\Delta x = r \cdot \frac{\lambda}{L} \quad (2)$$

dove r è la distanza sensore-target, λ la lunghezza d'onda del segnale trasmesso, L la lunghezza dell'antenna montata a bordo del satellite, e dove $\frac{\lambda}{L}$ rappresenta l'estensione angolare (in realtà la porzione nei 3dB) del fascio d'antenna in *azimuth* (Figura 2.5). L'equazione (2) riporta la risoluzione in *azimuth* nel caso di un Radar ad Apertura Reale (*Real Aperture Radar*, RAR), che è proporzionale alla distanza tra sensore e target (quindi dipende dalla quota di volo e dall'angolo di *off-nadir*) ed alla lunghezza d'onda e inversamente proporzionale alla lunghezza fisica dell'antenna; in questo caso, non è possibile ottenere tipicamente una risoluzione

particolarmente “spinta” in *azimuth* (nel caso di sensori radar ad apertura reale satellitari le risoluzioni sono dell'ordine delle decine di km), che risulta pertanto notevolmente peggiore anche della risoluzione in *range* (ordine dei m). Alla lunghezza d'onda delle microonde, non è quindi tipicamente consigliabile l'impiego del sistema RAR su piattaforme satellitari, se si desidera ottenere un'elevata risoluzione spaziale.

Un modo per superare questa limitazione consiste nell'utilizzare i sistemi Radar ad Apertura Sintetica (*Synthetic Aperture Radar, SAR*), che utilizzano il movimento dell'antenna lungo la linea di volo del satellite per migliorare la risoluzione spaziale nella direzione *azimuth*, lasciando invariata la risoluzione in *range* rispetto al RAR, senza aumentare le dimensioni dell'antenna fisica, utilizzando il concetto di “antenna sintetica”. L'idea di fondo è che l'oggetto che stiamo osservando si trovi nel fascio d'antenna per un determinato tempo, e che il radar possa osservarlo più volte e da più posizioni diverse lungo la linea di volo. In sostanza, un'antenna di dimensioni contenute viene spostata dal sensore lungo la direzione di volo in una serie di posizioni successive, da ognuna delle quali l'antenna trasmette un impulso e riceve la sua eco di ritorno. L'antenna col suo movimento sintetizza quindi un array d'antenne (array sintetico), cioè un allineamento di antenne elementari di lunghezza L lungo la direzione di volo. Questo significa che attraverso il movimento e l'elaborazione del segnale viene “sintetizzata” un'apertura di antenna estremamente più grande di quella reale, Figura 2.6 (Franceschetti e Lanari, 1999).

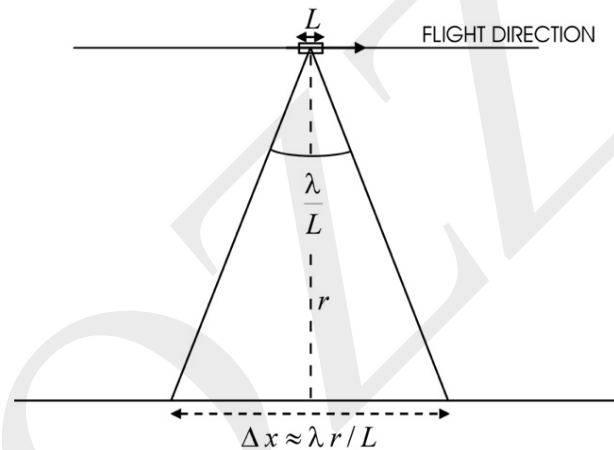


Figura 2.5 – Risoluzione in azimuth di un Radar ad Apertura Reale (RAR)

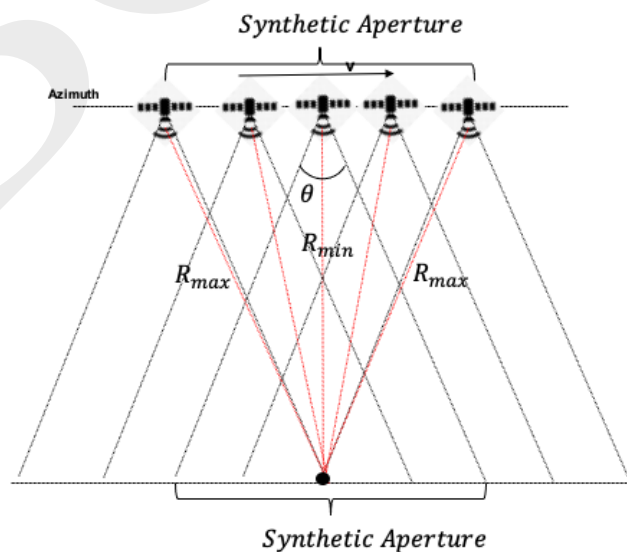


Figura 2.6 – Rappresentazione della apertura sintetica.

Si segnala che per quanto riguarda un sensore SAR gli echi retrodiffusi dalla scena sono registrati coerentemente, vale a dire in modulo e fase, e un sofisticato processo d'elaborazione effettuato sull'insieme degli echi ricevuti produrrà l'immagine SAR della superficie rilevata, la cui risoluzione in *azimuth* risulta essere pari a:

$$\Delta x = \frac{L}{2} \quad (3)$$

Si noti che nella equazione (3), rispetto alla (2), è scomparsa la dipendenza dalla lunghezza d'onda del segnale, ma soprattutto dalla distanza r del sensore dalla superficie osservata; inoltre l'equazione (2) va interpretata come segue: qualora diminuisse la lunghezza dell'antenna reale in *azimuth*, il suo fascio d'antenna si allargherebbe e quindi aumenterebbe l'estensione della apertura sintetica, consentendo pertanto di migliorare la corrispondente risoluzione spaziale.

L'aumento di risoluzione ottenibile con il SAR implica una imprescindibile fase di elaborazione del dato ricevuto. Tale fase, come anticipato, viene spesso denominata *Focalizzazione* (Franceschetti e Lanari, 1999) e conduce, a partire dal dato grezzo registrato dal sensore, alla generazione di un'immagine complessa detta Single Look Complex (*SLC*), Figura 2.7.

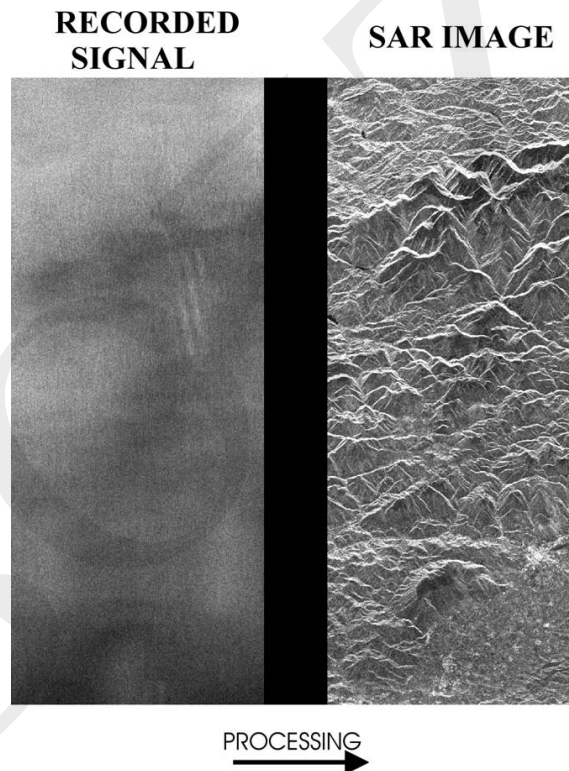


Figura 2.7 – Esempio di generazione a partire da un dato grezzo (*recorded signal*) di un'immagine SLC (*SAR image*)

Un'immagine SAR è quindi rappresentata in formato digitale, attraverso una matrice di $n \times m$ pixel in coordinate radar caratterizzati da un modulo o ampiezza E e da una fase φ , che contengono l'informazione legata ai segnali retrodiffusi dalla scena a terra (alternativamente i pixel possono essere rappresentati facendo riferimento, per ciascuno, alla parte reale e la parte immaginaria del segnale relativo all'immagine SAR). Il SAR, dunque, fornisce *immagini coerenti*: il modulo contiene informazioni sull'intensità del segnale retrodiffuso, legata alla riflettività della scena, e la fase, invece, dipende dalle caratteristiche geometriche ed elettromagnetiche della scena osservata e dalla distanza tra il sensore ed i target a terra.

In termini analitici, l'espressione di un'immagine complessa $\hat{\gamma}(x', r')$ è legata alle due coordinate generiche x' e r' , rispettivamente *azimuth* e *range*, che in prima approssimazione si può semplificare e scrivere (Franceschetti e Lanari, 1999):

$$\hat{\gamma}(x', r') \approx \gamma(x', r') \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r(x', r') \right] \quad (4)$$

$\gamma(x', r')$ è la riflettività della scena, la quale è una quantità complessa che caratterizza la risposta elettromagnetica della scena alla illuminazione radar e la cui ampiezza rappresenta l'informazione tipicamente utilizzata per visualizzare, in formato bidimensionale, le immagini SAR.

Il termine $\frac{4\pi}{\lambda} r(x', r')$ dell'equazione (4) rappresenta la componente dell'informazione di fase che è direttamente proporzionale al valore di r . Quest'informazione è utilizzata per la generazione di prodotti chiamati interferogrammi, che saranno meglio descritti più avanti, di fondamentale importanza per lo studio delle modifiche, in termini di spostamento, avvenute tra due immagini relative ad una zona d'interesse.

Nell'ampiezza delle immagini SAR, rappresentate mediante livelli di grigio, troviamo aree più chiare e più scure: maggiore è il livello di luminosità, maggiore è la capacità di riflettere l'impulso proveniente dal radar, da parte dei diversi target nella scena osservata, e quindi l'ampiezza della riflettività.

Questa proprietà dipende da molti fattori, quali ad esempio le caratteristiche della geometria di osservazione e quelle dei segnali trasmessi. Molto rilevanti sono però anche le caratteristiche fisiche e geometriche della scena illuminata; infatti, tanto più rugosa è la superficie, tanto più l'immagine apparirà con un maggiore livello di luminosità. Superfici piatte, come strade ed autostrade, hanno invece una bassissima retrodiffusione, e sono nettamente distinguibili nell'immagine radar, perché appaiono molto scure. La vegetazione normalmente è abbastanza scabra ed appare tipicamente uniformemente grigia; superfici inclinate verso il sensore, come ad esempio le pareti di montagne, mostrano una maggiore retrodiffusione rispetto alle superfici con pendenze in direzione opposta al radar, e nelle immagini sono molto chiare. Per quanto riguarda le costruzioni, gli edifici e le strade di città, il segnale emesso dal radar spesso ha la possibilità di essere riflesso più volte, e di tornare indietro poco indebolito, per cui questa forte retrodiffusione fa in modo che l'immagine risulti molto chiara, in presenza di queste superfici (Figura 2.8).

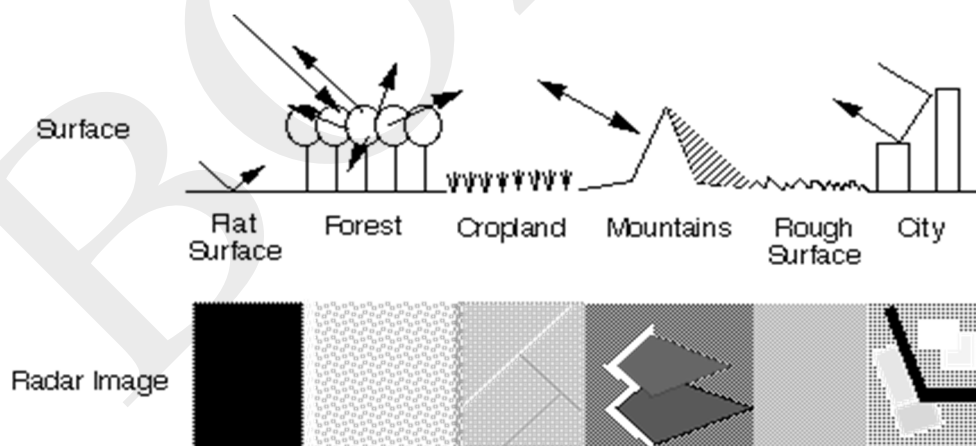


Figura 2.8 – Esempi di riflettività della scena osservata

Risulta pertanto evidente da quanto detto che, in generale, quando si visualizza un'immagine SAR essa risulta differente, anche geometricamente, da una omologa immagine ottica. Nell'interpretazione delle immagini ottenute mediante sensori SAR, è perciò estremamente importante comprendere gli effetti che tale sistema introduce e che lo differenziano, in modo sostanziale, dai più familiari sistemi ottici. In molte applicazioni, infatti, le immagini SAR sono caratterizzate da alcune distorsioni geometriche, dovute al fatto che l'antenna non "guarda" la scena verticalmente, ma lateralmente rispetto al nadir. Tali distorsioni devono quindi essere tenute nel dovuto conto quando si effettua l'interpretazione di una immagine radar. Un primo effetto è ben

descritto in Figura 2.9 nella quale ancora una volta la scala delle altezze è deformata per esaltare l'angolo di apertura del sensore radar di cui alla Figura 2.4. In particolare, in Figura 2.9 è mostrata, a parità di risoluzione (o equivalentemente della dimensione del pixel) in *slant range* (Δr), la variazione nel passaggio dal *near* al *far range* della risoluzione in *ground range* (Δy), anche in assenza di topografia: si osserva chiaramente che la proiezione a terra Δy è maggiore nel caso di punti prossimi al *near range*, minore nel caso in cui si operi nell'intorno del *far range*, essendo quindi la risoluzione generalmente peggiore in *near range* rispetto al *far range* (Franceschetti e Lanari, 1999).

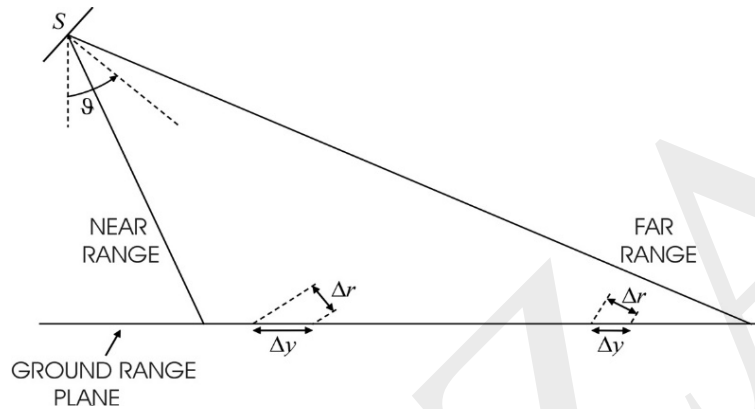


Figura 2.9 – Configurazione geometrica del sistema SAR: variazione della geometria *slant range* (Δr) e *ground range* (Δy) (Franceschetti e Lanari, 1999)

Un'ulteriore sorgente di distorsione è costituita dalla morfologia e dalla pendenza del terreno che generano sul piano *AZ* – *RG* delle deformazioni prospettiche comunemente denominate *foreshortening*, *layover* e *shadowing*, rappresentate schematicamente in Figura 2.10 e qui di seguito brevemente descritte (Franceschetti e Lanari, 1999):

- *Foreshortening*:
corrisponde in generale ad un effetto di dilatazione o di compressione del pixel (o, equivalentemente, della dimensione della cella di risoluzione), a seconda che si abbia la pendenza del terreno α maggiore o minore di 0° misurata rispetto al piano orizzontale, come schematizzato in Figura 2.10a; oltre a questo effetto si può osservare anche una maggiore luminosità dei pixel compressi in quanto l'energia del segnale di ritorno è molto elevata, essendo legata al contributo di un grande numero di oggetti riflettenti. Man mano che la pendenza α si avvicina a θ , ossia il terreno diventa perpendicolare alla LOS (definito in letteratura anche come limite di *layover*), la distanza compressa si riduce sempre di più e la luminosità aumenta sempre di più. Questo effetto è particolarmente evidente nelle immagini SAR di zone montuose in cui si vede il versante esposto alla vista del satellite molto compresso e luminoso, Figura 2.11.
- *Layover*:
rappresenta un caso estremo di *foreshortening* ed avviene nelle zone in cui la pendenza del terreno è maggiore dell'angolo θ ; considerando ad esempio la montagna schematizzata in Figura 2.10b, la parte più in alto (punto b) si trova ad essere più vicina al satellite e quindi viene rappresentata in coordinate radar in una posizione errata, ossia rovesciata in *slant range* rispetto alla parte più in basso (punto a). Pertanto, l'ordine di apparizione degli elementi nell'immagine radar è opposto all'ordine reale a terra.
- *Shadowing*:
alcune zone non vengono illuminate dall'impulso emesso dal radar, in quanto schermate da altre zone (sono cioè in "ombra"), Figura 2.10c.

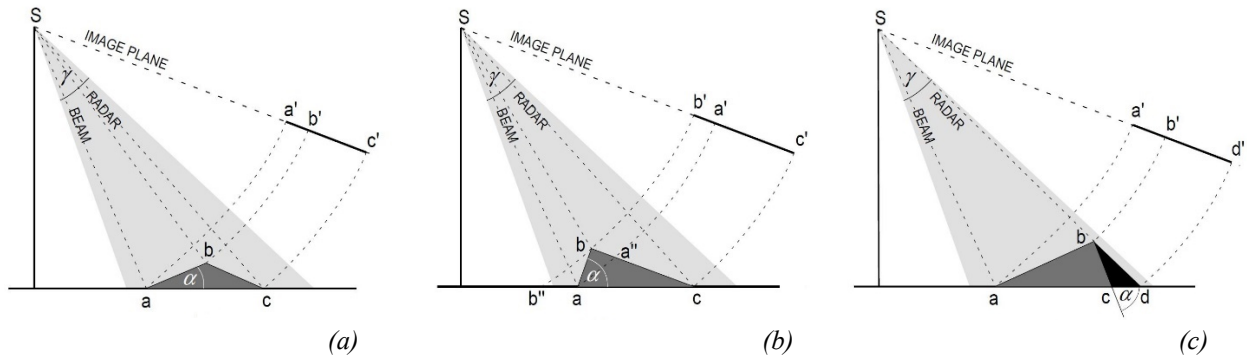


Figura 2.10 – Deformazioni geometriche legate alla conformazione altimetrica del terreno (a) Foreshortening, (b) Layover, (c) Shadowing, ripresa e modificata da Olmsted, 1993

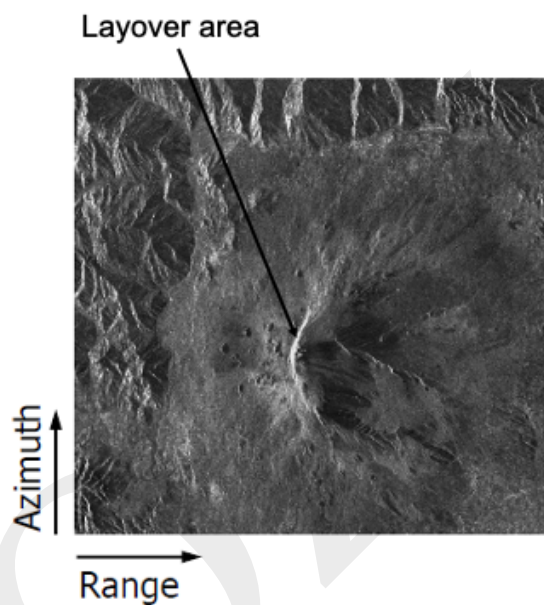


Figura 2.11 – Immagine SAR da satellite ERS (orbita ascendente) del monte Etna. La direzione slant range è orizzontale e il sensore radar riprende la scena volando a sinistra dal basso verso l'alto lungo la direzione di azimuth e acquisisce l'immagine da near range (sinistra) a far range (destra).

Si sottolinea che gli effetti delle distorsioni geometriche nelle immagini SAR cambiano però notevolmente a seconda dell'angolo di vista θ al quale il sensore satellitare opera. Un esempio a tal riguardo è riportato in Figura 2.12, dove sono raffigurate due immagini SAR relative alla stessa scena a terra (Monte Etna) ma acquisite da sensori satellitari con angoli di vista (*look angle*) differenti, rispettivamente 23° (Figura 2.12a) e 40° (Figura 2.12b).

Una presentazione sintetica delle diverse tipologie di sensore SAR satellitari maggiormente utilizzati è riportata nel successivo paragrafo 2.3.

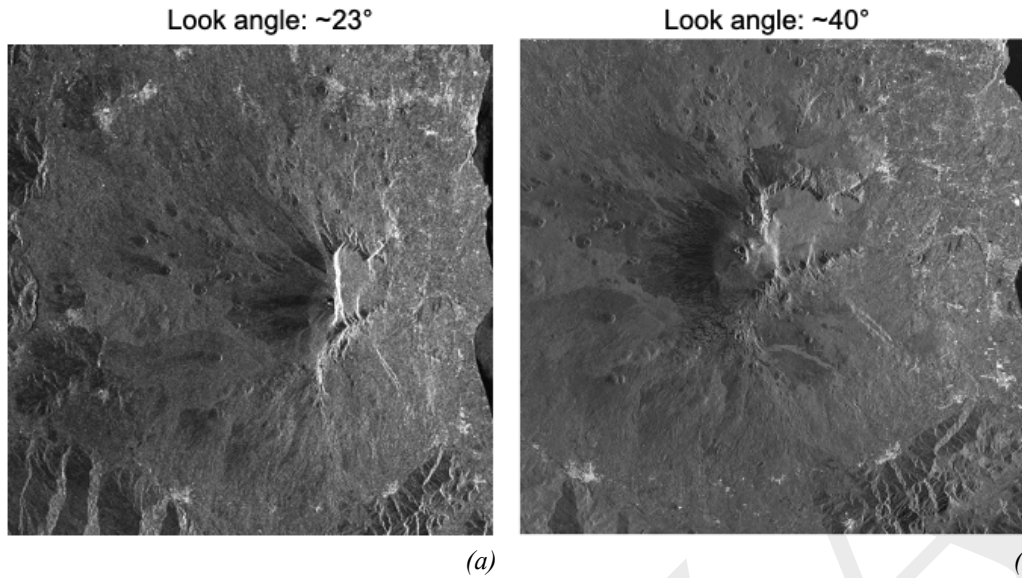


Figura 2.12 – Effetti dei diversi angoli di vista delle immagini SAR nelle distorsioni geometriche (a) Angolo di vista di 23°, (b) Angolo di vista di 40°

2.3 SATELLITI E SENSORI DISPONIBILI

Nel corso degli ultimi trent'anni il panorama dei satelliti per l'OT si è arricchito di numerosi sensori dotati di caratteristiche diverse in termini di risoluzioni spaziali, lunghezze d'onda, tempi di rivisitazione, copertura spaziale, ecc. In Figura 2.13 è riportata un'immagine che mostra in forma schematica i sensori che hanno operato e/o continuano ad essere operativi a partire dal 1991, con una macro-classificazione rispetto all'estensione dell'area illuminata a terra (*swath*) ed ai tempi di rivisitazione.

Nel seguito si descrivono brevemente le principali caratteristiche dei sensori SAR ampiamente utilizzati attualmente per analisi interferometriche (discusse nel seguito, si veda paragrafo 2.4): i satelliti ERS-1, ERS-2 ed ENVISAT, sviluppati dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA), la costellazione COSMO-SkyMed (CSK), sviluppata dall'Agenzia Spaziale Italiana in cooperazione con il Ministero della Difesa, e la costellazione Sentinel-1 (S-1), sviluppata dall'Agenzia Spaziale Europea nell'ambito del Programma Europeo Copernicus.

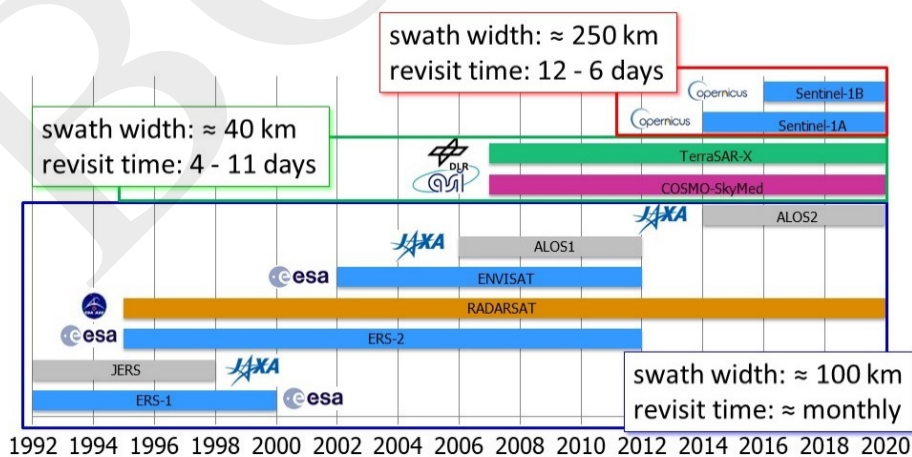


Figura 2.13 – Principali sensori SAR satellitari che hanno operato a partire dal 1991 e/o continuano ad essere operativi

2.3.1 ERS-1/2 ed ENVISAT

I tre satelliti ERS-1, ERS-2 ed ENVISAT sono stati sviluppati dall'ESA. Il primo dei tre, ERS-1 (*European Remote Sensing satellite*), ha operato dal 17 luglio 1991 al 10 marzo 2000, superando ampiamente il tempo di vita previsto. ERS-1 trasportava una schiera di strumenti per l'osservazione di diversi parametri ambientali della Terra (acqua, terra, ghiaccio e atmosfera), tra i quali un sensore SAR, operante in banda C (lunghezza d'onda pari a 5.6 cm), che acquisiva immagini con un tempo di rivisitazione sulla stessa area a terra pari a 35 giorni.

Il 21 aprile 1995 ESA ha lanciato in orbita un secondo satellite, ERS-2, gemello del primo, che ha operato fino al 5 settembre 2011. ERS-2 condivideva la stessa orbita (quasi) polare di ERS-1, ma con uno sfasamento temporale di 24 ore; in questo modo la stessa scena a terra veniva osservata a distanza di un giorno dai due satelliti ed ogni 35 giorni dal singolo satellite.

Successivamente, ESA ha sviluppato e messo in orbita un terzo satellite, ENVISAT (*Environmental Satellite*), che, come i suoi predecessori ERS-1 ed ERS-2, era caratterizzato, tra i vari strumenti di misura montati a bordo, da un sensore SAR operante in banda C (lunghezza d'onda pari a 5.6 cm) e da un tempo di rivisitazione pari a 35 giorni. ENVISAT ha operato dal 1° marzo 2002 all'8 aprile 2012. In Figura 2.14 è mostrato uno schema semplificato dell'intervallo di rivisitazione dei sensori ERS-1, ERS-2 ed ENVISAT.

In generale, i tre satelliti dell'ESA acquisivano primariamente in modalità *Stripmap* con una risoluzione spaziale di circa 5 m lungo la direzione *azimuth* e circa 20 m in *ground range*. L'area illuminata a terra aveva un'estensione di circa 100 km lungo il *range* ed i dati venivano acquisiti lungo orbite (*track*) sia ascendenti, sia discendenti. Per soli fini di disseminazione e fruizione, ciascun *track* veniva suddiviso in porzioni (*frame*) di pari dimensioni, in modo tale da avere per ogni frame un'area a terra di circa 100km x 100km.

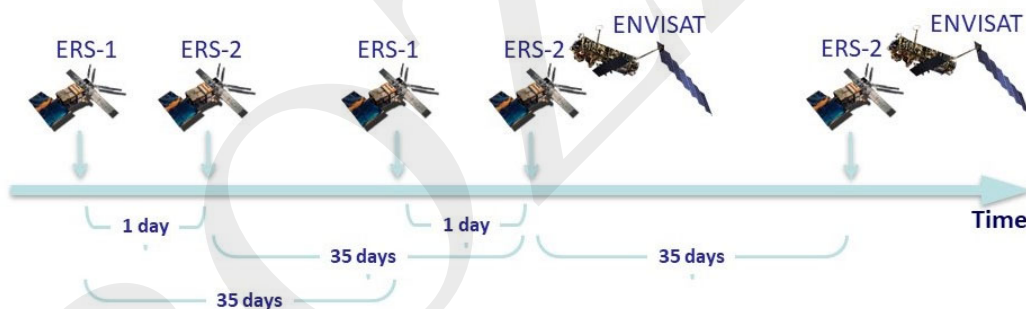


Figura 2.14 – Tempi di rivisitazione dei sensori ERS-1, ERS-2 ed ENVISAT

2.3.2 Costellazione COSMO-SkyMed

La costellazione COSMO-SkyMed (*CONstellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation*, spesso chiamata CSK) è costituita da 4 satelliti identici, dotati di un sensore SAR operante in banda X (lunghezza d'onda pari a 3.1 cm) ed è la prima missione di OT concepita per scopi duali, civili e militari, sviluppata da ASI in cooperazione con il Ministero della Difesa.

La costellazione è stata realizzata in forma graduale: il primo satellite è stato lanciato il 7 giugno 2007, il secondo il 9 dicembre dello stesso anno; il terzo satellite è partito il 25 ottobre del 2008, il quarto il 5 novembre 2010.

L'intervallo di rivisitazione per ciascun satellite della costellazione è pari a 16 giorni; lo sfasamento temporale tra i satelliti è tale da consentire, in condizioni di piena operatività dei quattro satelliti, di osservare la stessa scena a terra mediamente ogni quattro giorni. In Figura 2.15 è riportato uno schema semplificato dello scenario relativo ai tempi di rivisitazione dell'intera costellazione.

I quattro satelliti CSK sono progettati per acquisire in diverse modalità; le più utilizzate sono: *Stripmap HIMAGE*, caratterizzata da una risoluzione spaziale di circa 3m x 3m (lungo la direzione *azimuth* e *range*) e

swath di circa 40 km lungo il *range*; *Spotlight*, con una risoluzione spaziale inferiore ad 1 m e con uno *swath* di circa 10 km x 10 km (lungo il *range* e l'*azimuth*).

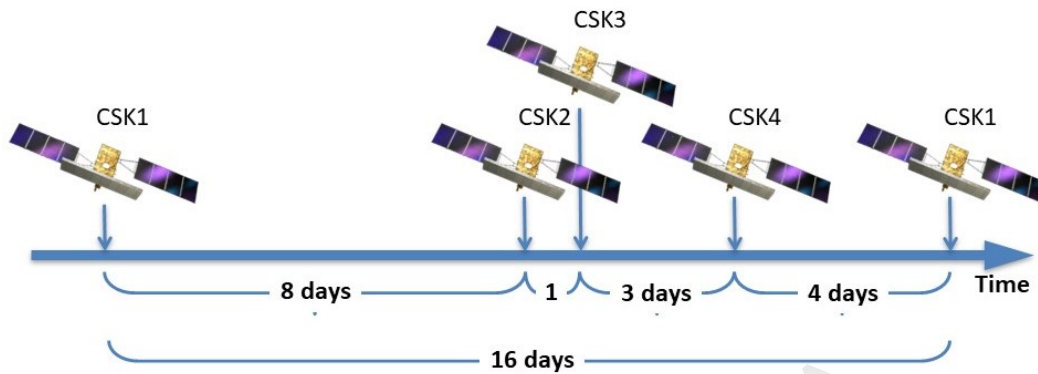


Figura 2.15– Tempi di rivisitazione dei sensori della costellazione COSMO-SkyMed

2.3.3 Costellazione Sentinel-1

La costellazione Sentinel-1 attualmente consta di 2 satelliti operanti anch'essi lungo orbite (quasi) polari con installato a bordo di ciascuno un sensore SAR operante in banda C (lunghezza d'onda pari a 5.56 cm). Il primo satellite, Sentinel-1A (S-1A) è stato messo in orbita il 3 aprile del 2014; il secondo satellite, Sentinel-1B (S-1B), gemello del primo, il 25 aprile 2016. L'intervallo di rivisitazione della stessa scena è pari a 12 giorni per il singolo satellite della costellazione; tale intervallo è sceso a 6 giorni con la piena operatività del secondo satellite. La Figura 2.16 illustra in maniera schematica l'intervallo di rivisitazione dell'intera costellazione.

I satelliti della costellazione Sentinel-1 sono stati progettati per acquisire sulle terre emerse in modalità TOPS (*Terrain Observation by Progressive Scans*), che permette di collezionare immagini nella modalità di acquisizione *Interferometric Wide Swath* (IWS), con una risoluzione spaziale di circa 15 m lungo l'*azimuth* e circa 4 m lungo la direzione *range*. L'area illuminata al suolo (*slice*) ha un'estensione di circa 200 km (lungo l'*azimuth*) x 250 km (lungo il *range*).

La costellazione Sentinel-1 acquisisce in modalità programmata con l'obiettivo di generare robusti archivi di immagini su estese porzioni di superficie terrestre per programmi di monitoraggio a lungo termine; inoltre, opera con una politica di accesso ai dati completamente *free&open*, consentendo in tal modo la costituzione (ed il relativo accesso) di un vastissimo archivio di dati SAR (<https://scihub.copernicus.eu/>).

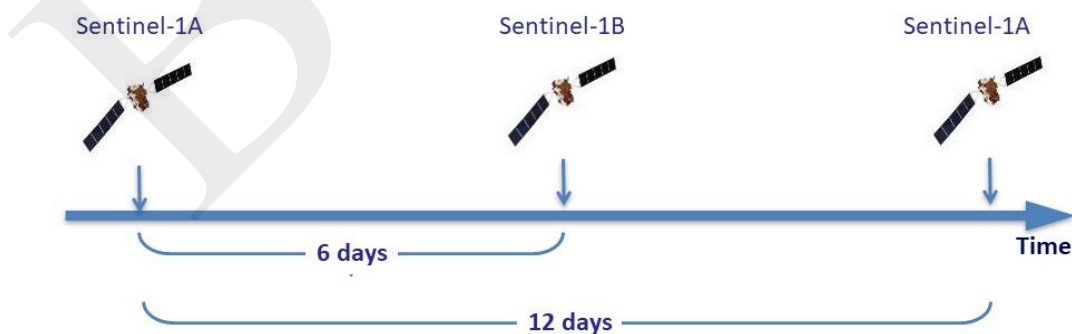


Figura 2.16 – Tempi di rivisitazione dei sensori della costellazione Sentinel-1

2.4 INTERFEROMETRIA SAR DIFFERENZIALE DA SATELLITE

L'Interferometria SAR differenziale (*DInSAR*, *Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry*) è una tecnica di telerilevamento alle microonde che consente di estrarre informazioni sullo spostamento degli elementi presenti sulla superficie terrestre e/o della superficie terrestre stessa (Rosen et al., 2000) (Figura 2.17).

La tecnica DInSAR, sfruttando la differenza di fase tra due immagini SAR, acquisite dal satellite sulla stessa area in tempi diversi (ed eventualmente anche da due posizioni orbitali leggermente diverse), dopo la rimozione della topografia media della scena a terra ricavata da un modello digitale del terreno (DEM o DTM, si veda paragrafo 2.7), consente di ricavare la misura della componente dello spostamento, in termini di avvicinamento o allontanamento dal sensore e proiettata lungo la linea di vista del sensore. Il tempo intercorso tra le due acquisizioni viene definito *baseline temporale*, la distanza tra le due posizioni lungo l'orbita del satellite durante le due acquisizioni prende il nome di *baseline spaziale* (che è nulla qualora il satellite riesca a descrivere esattamente la stessa orbita nei due passaggi). Una delle due immagini viene scelta come riferimento e prende il nome di *master* (tipicamente corrisponde all'immagine acquisita prima nel tempo), mentre l'altra viene denominata *slave*. La differenza di fase (o fase interferometrica) misurata è intesa come variazione della fase dell'immagine *slave* rispetto all'immagine *master* di riferimento. Inoltre, le misure di spostamento ricavabili dall'analisi interferometrica sono di tipo differenziale sia nel tempo sia nello spazio. Infatti, gli eventuali spostamenti misurati sono calcolati rispetto alla data dell'immagine *master* (*Reference Date*) e rispetto ad un pixel (*Reference Point*), scelto in una zona ritenuta stabile o di deformazione nota. La differenza di fase $\Delta\varphi$ tra due immagini SAR dà luogo al cosiddetto *interferogramma* o *frange interferometriche*:

$$\Delta\varphi(x', r') = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r(x', r') + \Delta\varphi^{\text{rumore}}(x', r') \quad (5)$$

dove λ è la lunghezza d'onda del segnale trasmesso/ricevuto, e per ogni pixel (x', r') , Δr rappresenta la differenza di distanza sensore-bersaglio tra la prima e la seconda immagine e $\Delta\varphi^{\text{rumore}}$ è il segnale del rumore. Si segnala altresì che da ora in poi si ometteranno, al fine di semplificare le notazioni usate, le generiche coordinate (x', r') del pixel. L'interferogramma è un'immagine bidimensionale nel piano *range* e *azimuth* rappresentato con una serie di frange (in quanto la fase interferometrica è arrotondata, cosiddetta *wrapped phase*), i cui valori sono compresi fra $-\pi$ e $+\pi$.

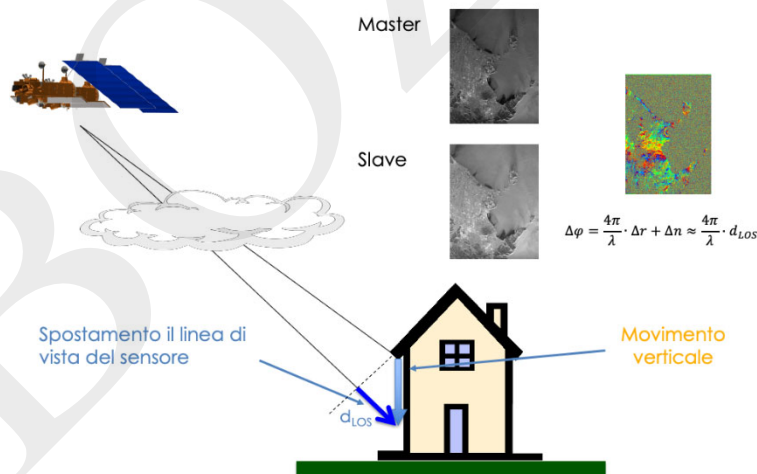


Figura 2.17 – Schema relativo al principio base dell'Interferometria

In Figura 2.18 è riportato un esempio di interferogramma, ottenuto considerando due immagini SAR acquisite dai sensori della costellazione CSK il 4 ed il 12 aprile 2009 lungo orbite ascendenti; tale interferogramma mostra la presenza di numerose frange interferometriche che rivelano le deformazioni superficiali co-sismiche associate al terremoto che ha colpito la città de L'Aquila il 6 aprile 2009. A ciascuna frangia corrisponde un ciclo completo di fase (pari a 2π), identificato da un'escursione completa della scala di colori (da rosso a viola).

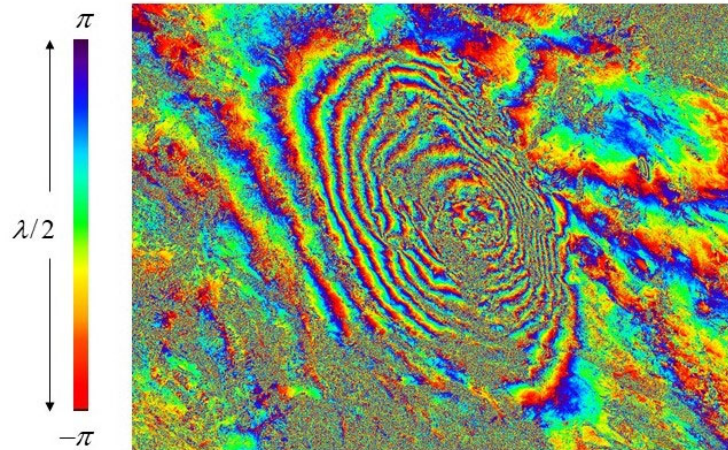


Figura 2.18 – Interferogramma co-sismico relativo al terremoto che ha colpito la città de L'Aquila il 6 aprile 2009 ed ottenuto con immagini SAR COSMO-SkyMed acquisite il 4 ed il 12 aprile 2009 lungo orbite ascendenti.

In Figura 2.19 è riportato il classico esempio di scenario DInSAR, nel piano ortogonale alla direzione *azimuth*, in cui tra i due passaggi del sensore, avvenuti agli istanti t_1 e t_2 e da posizioni leggermente diverse (baseline spaziale b tra le immagini SAR1 e SAR2) si è verificato uno spostamento superficiale la cui proiezione lungo la linea di vista del sensore è pari a d_{LOS} .

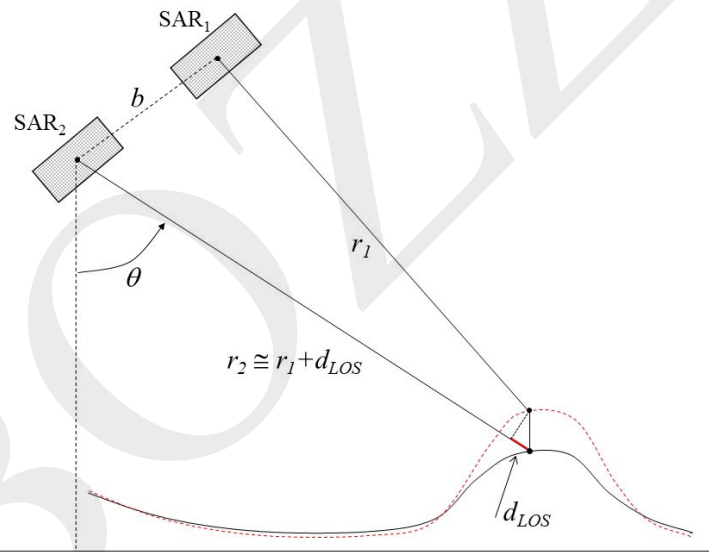


Figura 2.19 – Scenario DInSAR nel piano ortogonale alla direzione di volo (*azimuth*). SAR₁ e SAR₂ indicano la posizione del sensore SAR nei due passaggi avvenuti negli istanti di tempo t_1 e t_2 , e tra i quali si verifica una deformazione del suolo (linea rossa tratteggiata). r_1 ed r_2 indicano la distanza sensore-bersaglio rispettivamente agli istanti t_1 e t_2 , θ l'angolo di vista del sensore, b la distanza tra le due orbite (baseline spaziale) lungo cui avvengono le due acquisizioni e d_{LOS} (linea rossa continua) lo spostamento avvenuto, nell'intervallo di tempo t_1 - t_2 (baseline temporale) e misurato lungo la linea di vista del sensore.

L'espressione della differenza di fase $\Delta\varphi$ riportata nell'equazione (5) può essere scomposta nelle sue principali componenti. Infatti, $\Delta\varphi$ è la somma di diversi contributi di fase e può essere espressa come segue:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi^{spostamento} + \Delta\varphi^{topografia} + \Delta\varphi^{atmosfera} + \Delta\varphi^{res_orbite} + \Delta\varphi^{rumore} \quad (6)$$

dove $\Delta\varphi^{spostamento}$ è il segnale di deformazione corrispondente allo spostamento avvenuto tra le due acquisizioni SAR; $\Delta\varphi^{topografia}$ è il segnale di topografia residua della scena osservata rispetto a un sistema

di riferimento globale e dipende dalla baseline dell'interferogramma e dalla quota del punto; $\Delta\varphi^{atmosfera}$ è il segnale dovuto a possibili disomogeneità atmosferiche tra le due acquisizioni SAR che introducono ritardi spuri nel segnale; $\Delta\varphi^{res_orbite}$ rappresenta i residui di fase dovuti all'inaccurata conoscenza delle orbite descritte dal satellite durante le acquisizioni; ed, infine, $\Delta\varphi^{rumore}$ è il segnale legato al rumore di decorrelazione, e.g. decorrelazione spaziale, causata da una eccessiva distanza - baseline spaziale - tra le orbite percorse dal satellite durante le due acquisizioni; decorrelazione temporale, causata dal cambiamento delle proprietà elettromagnetiche della scena a terra (ad esempio per effetto di eventi meteorologici che hanno modificato le caratteristiche della scena tra i due passaggi - una nevicata, il passaggio di una nuvola - ovvero per effetto di altre modifiche della scena, quali un campo che viene arato, l'effetto di un incendio) soprattutto nel caso di acquisizioni lontane tra loro nel tempo.

A causa del fatto che in orbite successive il satellite non ripercorre esattamente la stessa traiettoria sull'orbita, la differenza di fase legata alla distanza satellite - sensore $\Delta\varphi$ contiene informazioni sia sullo spostamento degli oggetti a terra sia sulla topografia dell'area (Burgmann et al., 2000). Tenendo conto della distanza tra le orbite effettivamente percorse dal satellite durante l'acquisizione delle immagini (baseline perpendicolare), la fase topografica è calcolata per ogni punto della griglia di riferimento SAR a partire dalla distanza sensore-target tra le due immagini, stimata sfruttando la conoscenza di precise informazioni orbitali e di un accurato Modello Digitale del Terreno (DEM) esterno.

La componente di fase associata allo spostamento dei punti della scena a terra $\Delta\varphi^{spostamento}$ è ricavata attraverso la rimozione di questo contributo di fase associato alla topografia media della scena (cosiddetto "interferogramma sintetico") dalla fase originaria della coppia interferometrica, eq. (6). Il risultato di questa rimozione porta alla generazione di quello che genericamente viene chiamato "interferogramma differenziale", ossia un interferogramma arrotondato dove l'informazione di ciascun punto è principalmente legata allo spostamento avvenuto nell'intervallo di tempo tra le due acquisizioni.

A partire dall'interferogramma differenziale, supponendo di non avere residui di fase topografica e di poter trascurare, sotto opportune considerazioni, i contributi di fase dovuti all'atmosfera, agli errori orbitali e al rumore, la differenza di fase misurata $\Delta\varphi$ è costituita dal solo contributo $\Delta\varphi^{spostamento}$ legato alla variazione della distanza tra sensore e bersaglio Δr associata allo spostamento dei punti nell'intervallo di tempo tra le due immagini, misurata lungo la LOS del sensore, e può essere ragionevolmente espressa come:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi^{spostamento} \approx \frac{4\pi}{\lambda} \cdot d_{los} \quad (7)$$

Invertendo la relazione (7) si può ottenere la misura dello spostamento avvenuto lungo la LOS d_{LOS} :

$$d_{LOS} \approx \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (8)$$

Dall'equazione (8) discende che ad una variazione di fase di 2π (ossia un'intera frangia interferometrica) corrisponde uno spostamento lungo la LOS di $\lambda/2$. Inoltre, si osserva che lo spostamento che si vuole misurare risulta essere direttamente collegato alla fase interferometrica, di cui, però, se ne conosce originariamente solo una determinazione principale (i valori di fase appartengono all'intervallo $]-\pi, \pi]$). Pertanto, è necessaria un'operazione detta di srotolamento della fase (*Phase Unwrapping*), applicata alla fase interferometrica calcolata direttamente dalle coppie di immagini SAR, che consente di recuperare la variazione di fase assoluta (passando dalle cosiddette fasi "arrotondate" alle fasi "srotolate"). L'accuratezza con cui è possibile misurare gli spostamenti superficiali è pari ad una frazione della lunghezza d'onda alla quale opera il sensore SAR; lavorando nel campo delle microonde (lunghezze d'onda tipicamente di alcuni cm) è, pertanto, possibile raggiungere accuratezze anche di pochi millimetri.

Grazie alla capacità di generare mappe degli spostamenti del suolo ad elevata densità spaziale e con costi relativamente limitati, l'Interferometria SAR è stata applicata con successo per misurare una larga varietà di processi naturali ed antropici, come eventi sismici, instabilità (*unrest*) vulcaniche, frane sismo-indotte e fenomeni di subsidenza. Nonostante ciò, una grande limitazione della tecnica DInSAR "convenzionale",

basata sull'analisi di singoli interferogrammi, è dovuta all'accuratezza con la quale è possibile separare efficacemente il contributo di fase legato alla deformazione della scena a terra da quelli legati agli errori del DEM utilizzato per la compensazione della fase topografica, agli errori dovuti all'inaccuratezza delle informazioni orbitali e alle variazioni delle condizioni atmosferiche tra le acquisizioni, difficili da compensare in assenza di modelli atmosferici affidabili. Inoltre, la qualità dei risultati è intrinsecamente limitata, a volte del tutto compromessa, in relazione alle sorgenti rumorose (intrinseche agli interferogrammi stessi) legate alle caratteristiche geometriche tipiche della configurazione DInSAR (decorrelazione spaziale), ed ai cambiamenti delle caratteristiche elettromagnetiche (riflettività) dei target a terra nell'intervallo di tempo di osservazione del fenomeno (decorrelazione temporale). La presenza di neve e di zone vegetate o i cambiamenti climatici e meteorologici sono tutte cause di fenomeni di decorrelazione temporale, i cui effetti sono ridotti in presenza di centri urbani e rocce esposte, caratterizzati da una risposta del segnale radar costante nel tempo, e diminuiscono utilizzando lunghezze d'onda più grandi (ad esempio banda L invece di banda X). Un altro fattore che limita fortemente l'applicabilità della tecnica Interferometria SAR per lo studio delle deformazioni superficiali è legato alla presenza delle distorsioni geometriche discusse nel paragrafo 2.2, che possono inficiare significativamente la qualità degli interferogrammi generati.

2.5 PRINCIPALI TECNICHE DI INTERFEROMETRIA SAR MULTI-TEMPORALE

Per superare le limitazioni della tecnica DInSAR "convenzionale", l'interesse della comunità scientifica si è concentrato sempre più verso lo sviluppo di tecniche DInSAR avanzate multi-temporali, capaci di fornire informazioni accurate sulla distribuzione spaziale e sull'evoluzione temporale degli spostamenti superficiali avvenuti nell'area d'interesse durante un certo periodo, attraverso la generazione di serie temporali di spostamento e di mappe di velocità media di spostamento. Tali approcci si basano sull'utilizzo di grandi dataset, costituiti da decine (a volte centinaia) di immagini SAR relative alla stessa area e di altrettanti interferogrammi differenziali, che sono opportunamente combinati per ricavare informazioni sull'evoluzione temporale degli spostamenti superficiali. Nonostante la notevole complessità algoritmica e i tempi di calcolo decisamente più lunghi rispetto alle tecniche interferometriche "classiche" (analisi di un solo/pochi interferogrammi), l'informazione ottenuta negli approcci multi-temporali utilizzando un gran numero di immagini e di interferogrammi porta ad un notevole miglioramento della accuratezza delle misure di spostamento, grazie alla stima dei possibili contributi atmosferici delle immagini e degli errori topografici e grazie all'utilizzo di tecniche per lo srotolamento della fase, basate su algoritmi che sfruttano contemporaneamente informazioni di fase interferometrica nello spazio e nel tempo.

Negli ultimi 20 anni sono state sviluppate numerose tecniche DInSAR multi-temporali, che si differenziano principalmente per il tipo di target con cui lavorano e per il criterio di selezione degli interferogrammi, che possiamo raggruppare in due grandi categorie: gli approcci *Persistent Scatterer* (PS) e *Small Baseline* (SB). In particolare, le tecniche PS lavorano con interferogrammi a piena risoluzione spaziale (*single look*), ossia interferogrammi che non hanno subito alcuna operazione di media spaziale; all'interno della cella di risoluzione si assume la presenza di un solo scatteratore dominante ritenuto coerente per tutto l'intervallo di tempo di osservazione. Tale assunzione vale solo per un piccolo insieme di scatteratori cosiddetti "persistenti", la cui risposta elettromagnetica "persiste" nel tempo, ossia la cui informazione di fase è preservata in tutti gli interferogrammi differenziali, indipendentemente dai valori di baseline delle coppie scelte, restando praticamente immuni agli effetti di decorrelazione spaziale e temporale. Ciò permette di poter lavorare anche con baseline spaziali e temporali molto grandi, senza imporre alcun vincolo sulle separazioni massime tra le orbite di acquisizione delle immagini. Le tecniche PS spesso fanno uso di interferogrammi generati senza alcun vincolo sulle baseline rispetto ad un'unica immagine *master* comune al dataset. Ciò permette di utilizzare un numero minimo d'interferogrammi dai quali si ottiene un problema determinato, la cui soluzione consiste nel risolvere un sistema in $N-1$ incognite ed $N-1$ equazioni, essendo N il numero di immagini SAR analizzate. Di contro, tali approcci, a causa dell'utilizzo di interferogrammi a grande baseline che sono affetti da decorrelazione, sono caratterizzati da limitate densità spaziali dei punti rilevati, soprattutto nel caso di analisi

interferometriche effettuate su aree vegetate e rurali caratterizzate da un ridotto numero di scatteratori dominanti.

Infine, si sottolinea che lo srotolamento della fase interferometrica, passo decisamente critico nella catena di elaborazione DInSAR avanzata, avviene considerando dei modelli lineari che schematizzano l'andamento degli spostamenti nel tempo; pertanto, le tecniche PS non risultano adatte per l'analisi di fenomeni deformativi fortemente non lineari.

Le tecniche SB, invece, si basano sull'assunzione di *scattering* spazialmente distribuito all'interno della cella di risoluzione, per cui è possibile osservare anche scatteratori cosiddetti *distribuiti*; ciò porta come immediato vantaggio che la densità dei punti che possono essere rilevati nelle analisi interferometriche SB aumenta notevolmente rispetto ai metodi PS. D'altra parte, i target distribuiti sono molto più sensibili agli effetti di decorrelazione spaziale e temporale rispetto a quelli dominanti, per cui non si può prescindere da un'accurata selezione degli interferogrammi differenziali da usare per lo srotolamento della fase. Pertanto, gli approcci SB si differenziano dagli approcci PS, perché in questo caso viene imposto un criterio nella scelta delle coppie interferometriche utilizzate basato sulla minimizzazione delle baseline spaziali e temporali. Ciò consente di limitare i problemi di decorrelazione, direttamente legati ai valori di baseline degli interferogrammi, incrementando la densità dei punti coerenti considerati analizzabili. Ovviamente, la selezione delle coppie interferometriche a piccola baseline porta alla necessità di non poter più considerare un'unica immagine *master* per tutto il dataset (come nelle tecniche PS), ma di avere più immagini *master*, con il maggiore svantaggio di dover eventualmente gestire sottoinsiemi (*subset*) di interferogrammi SB separati da larghe baseline. In questo caso, i subset sono tra loro indipendenti e le informazioni di spostamento ricavate per ogni subset singolarmente devono essere opportunamente combinate tra loro per ricavare le serie temporali di spostamento relative all'intero dataset; in caso contrario, si è costretti a ridurre il numero delle immagini da considerare per le analisi.

Infine, le tecniche SB operano tipicamente (ma non esclusivamente) a una risoluzione spaziale ridotta attraverso un'operazione di media complessa (denominata *multi-look*) sugli interferogrammi, per aumentare il rapporto segnale-rumore delle fasi interferometriche. Se da un lato questo comporta una perdita in termini di risoluzione spaziale, dall'altro permette di aumentare la densità dei punti rilevati anche in presenza di aree rurali o poco urbanizzate, consentendo di preservare le potenzialità dei sistemi SAR satellitari di effettuare analisi interferometriche a larga scala con limitati costi del monitoraggio; ciò rende questi approcci particolarmente adatti all'analisi di fenomeni deformativi in aree spazialmente estese, dovuti a processi sia naturali come eventi sismici e attività vulcaniche, sia antropici, come fenomeni di subsidenza e di dissesto idrogeologico. Più recentemente, le tecniche SB sono state estese ad analisi interferometriche multi-scala, basate sull'utilizzo di interferogrammi a piena e a media risoluzione spaziale, per identificare scatteratori sia dominanti sia distribuiti.

Di seguito, sono brevemente riportate alcune tra le più diffuse tecniche avanzate multi-temporali di Interferometria SAR satellitare:

- Tecnica PSInSARTM
- Tecnica DInSAR – SBAS
- Tecnica SqueeSARTM
- Tecnica StaMPS (Stanford Method for *Persistent Scatterers*)
- Tomografia SAR (TomoSAR)

2.5.1 Tecnica PSInSARTM

La tecnica PSInSARTM è una tecnica *Persistent Scatterer Interferometry (PSI)* (Ferretti et al., 2000; Ferretti et al., 2001), nata nel 1999 con lo sviluppo ed il brevetto dell'algoritmo PSInSARTM da parte del Politecnico di Milano e la concessione in licenza a TRE, successivamente diventata TRE Altamira (TRE, 2020). Questa tecnica si basa sull'osservazione che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, costituito dai diffusori permanenti (*Permanent Scatterers*), è in sostanza immune dagli effetti di decorrelazione temporale e pertanto

mostra caratteristiche ideali per le osservazioni interferometriche. I *Permanent Scatterers* sono bersagli radar identificati dal satellite sulla superficie terrestre mediante un complesso algoritmo di elaborazione numerica dei segnali che si distinguono per il fatto di possedere un'elevata stabilità della risposta elettromagnetica nel tempo. I *Permanent Scatterers* corrispondono tipicamente ad elementi già presenti al suolo, quali porzioni di manufatti - edifici, monumenti, strade, linee ferroviarie, antenne, tralicci, elementi metallici - oppure elementi naturali - affioramenti rocciosi, accumuli di detrito - (Regione Liguria, 2020; TRE, 2008).

L'elaborazione dei *Permanent Scatterers* segna il passaggio da un'analisi per coppie di immagini, tipica dell'interferometria differenziale classica (DInSAR), ad un'analisi multi - immagine dell'intero dataset disponibile sull'area di interesse. Tra le N immagini SAR disponibili viene individuata una unica immagine *master*, mentre tutte le altre, identificate come *slave*, vengono confrontate sempre con l'immagine *master* generando complessivamente $(N - 1)$ interferogrammi (Regione Liguria, 2020).

La stima della componente atmosferica è uno dei punti di forza della tecnica PSInSARTM ed è effettuata basandosi sull'analisi di un sottoinsieme di punti. Essendo il contributo atmosferico variabile lentamente nello spazio, esso viene esteso a tutto l'insieme dei punti dell'area con un opportuno processo di interpolazione ed eliminato dalla fase interferometrica (TRE, 2020).

Per quanto riguarda la precisione delle misure fornite, considerando un set di dati di almeno 40 immagini che coprono un periodo di 2 anni, un punto di misurazione situato a meno di 1 km di distanza dal punto di riferimento (*Reference Point*) ha un errore di ± 1 mm/anno sulle misure della velocità media di spostamento e di ± 5 mm sulle misure dello spostamento (Regione Liguria, 2020; TRE, 2008).

2.5.2 Tecnica SBAS-DInSAR

La tecnica DInSAR denominata SBAS, acronimo di *Small Baseline Subset*, è stata sviluppata dai ricercatori dell'Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA) del CNR nel 2002 (Berardino et al., 2002). Tale approccio si basa su un'appropriata combinazione di un gran numero di coppie interferometriche ottenute a partire da dati SAR acquisiti da orbite sufficientemente vicine (piccole baseline spaziali) e con ridotti tempi di rivisitazione sulla stessa scena (piccole baseline temporali). Queste caratteristiche consentono di minimizzare gli effetti di rumore (decorrelazione spaziale e temporale), in modo tale da massimizzare il numero di punti coerenti - dal punto di vista elettromagnetico - per unità di area per i quali si riesce a fornire una misura affidabile degli spostamenti. A partire dall'opportuna elaborazione di tali coppie interferometriche, è possibile generare mappe di velocità media di spostamento spazialmente dense con estensione di diverse centinaia di migliaia di km² e, per ogni punto coerente, è possibile anche seguire l'evoluzione temporale dello spostamento avvenuto nel periodo di interesse attraverso la generazione di serie temporali di spostamento. Ciò si ottiene attraverso l'inversione di un sistema lineare sovradeterminato, con M interferogrammi e N incognite (i.e. le fasi associate alle acquisizioni), con $M > N$; nel caso di presenza di più subset separati da grandi baseline, il sistema può essere risolto applicando il metodo della Decomposizione ai Valori Singolari (*Singular Value Decomposition*. SVD), un algoritmo matematico che permette di trovare una soluzione ai minimi quadrati con vincolo di norma minima di un sistema lineare che non abbia rango pieno, e quindi non ammetta un'unica soluzione ai minimi quadrati. L'approccio SBAS permette di preservare le caratteristiche di ampia copertura spaziale tipiche dei sistemi satellitari, generando prodotti avanzati DInSAR con accuratèzze di $\pm 1-2$ mm/anno sulle misure di velocità media di spostamento e di ± 5 mm sulle misure di spostamento (Casu et al., 2006; Bonano et al., 2013).

Il suo punto di forza risiede nella capacità di effettuare analisi degli spostamenti a diverse scale di risoluzione spaziale (*approccio a due scale*), producendo serie temporali di spostamento a scala sia regionale sia locale (Lanari et al., 2004; Manunta et al., 2008; Bonano et al., 2012). L'analisi alla scala regionale (*analisi a media risoluzione spaziale*) permette di ricavare informazioni medie sugli spostamenti relativi ad aree che si estendono per alcune migliaia di chilometri quadrati (risoluzione media di circa 30-100 m), ed è particolarmente utile per analisi di fenomeni naturali quali eventi sismici, vulcanici, subsidenze ed estrazione di petrolio e gas; l'analisi alla scala locale (*analisi a piena risoluzione spaziale*) consente di indagare nel

dettaglio aree sensibili sfruttando la piena risoluzione del sensore (da 3 a 10 m circa), al fine di rilevare pattern deformativi anche molto localizzati spazialmente che mostrano uno spostamento relativo rispetto a quello medio del terreno. Tale analisi è particolarmente adatta allo studio di dettaglio delle deformazioni di strutture antropiche, come quelle che interessano singoli edifici, infrastrutture critiche (Lanari et al., 2004; Lanari et al., 2020) o frane, rappresentando un valido strumento a supporto delle attività di controllo e salvaguardia del territorio sia naturale sia antropizzato.

È utile osservare che l'approccio SBAS a due scale spaziali necessita, come punto di partenza, dell'informazione di spostamento medio del suolo, generato dall'analisi alla scala regionale, il quale viene opportunamente sottratto dagli interferogrammi a piena risoluzione spaziale per isolare la sola componente ad alta frequenza, che deve essere successivamente elaborata per estrarre il segnale di spostamento ad alta risoluzione spaziale.

2.5.3 Tecnica SqueeSAR™

La tecnica SqueeSAR™ (Ferretti et al., 2011) è un'evoluzione della tecnica PSInSAR™ brevettata da TRE Altamira in collaborazione con il Politecnico di Milano (TRE, 2008). L'analisi delle deformazioni superficiali si ottiene mediante la stima degli spostamenti di bersagli radar già presenti al suolo e visibili da satellite, sia puntiformi PS, sia spazialmente distribuiti DS (*Distributed Scatterers*). I bersagli puntiformi PS corrispondono generalmente a parti di edifici, strutture antropiche e rocce esposte mentre i bersagli distribuiti DS corrispondono a porzioni di terreno poco vegetate dove la risposta radar è omogenea seppur ridotta rispetto ai bersagli puntiformi, (TRE, 2020; Regione Liguria, 2020; TRE, 2008).

Nella tecnica SqueeSAR™ *Standard* alcune fasi dell'elaborazione dei dati sono realizzate in modo semiautomatico per consentire un'estensione areale maggiore, mentre nella tecnica SqueeSAR™ *Advanced* è previsto il costante intervento di personale specializzato in ogni fase del processo di elaborazione, così da massimizzare il contenuto informativo ricavabile dai dati. Ciò si traduce nella restituzione di tutti i possibili punti di misura radar satellitari con informazione significativa (TRE, 2008).

Per quanto riguarda la precisione delle misure fornite questa tecnica le specifiche sono sostanzialmente consistenti con quelle riportate per la tecnica PSInSAR™.

2.5.4 Tecnica StaMPS

La tecnica StaMPS (Hooper et al., 2004), acronimo di *Stanford Method for Persistent Scatterers*, è stata inizialmente sviluppata presso la Stanford University. Sviluppi successivi delle tecniche StaMPS e StaMPS/MTI hanno avuto luogo presso la University of Iceland, la Delft University of Technology e la University of Leeds. La tecnica StaMPS implementa un metodo DInSAR *Persistent Scatterers* (PS), sviluppato per operare anche in territori non antropizzati e/o interessati da deformazioni in regime non stazionario. La tecnica StaMPS/MTI (*Multi-Temporal DInSAR*) rappresenta un'estensione della tecnica StaMPS, includendo le metodologie *Small Baseline* e *combined multi-temporal DInSAR* (Hooper et al., 2013). Al fine di migliorare l'affidabilità in aree non urbane, la tecnica StaMPS si basa su una correlazione spaziale delle fasi interferometriche, per la ricerca di pixel caratterizzati da una ridotta variazione di fase. Inoltre, per la loro identificazione, non è richiesta una conoscenza preliminare della variazione nel tempo della velocità di spostamento (Hooper et al., 2007). La tecnica prevede una prima selezione dei pixel basandosi sull'analisi della loro ampiezza, attraverso la valutazione dell'indice di dispersione di ampiezza (Ferretti et al., 2001). Successivamente, viene effettuata una selezione finale valutando una stima della stabilità di fase di ciascun candidato pixel, attraverso una *phase analysis* (Hooper et al., 2007). L'approccio StaMPS fornisce buoni risultati in caso di velocità di spostamento basse rispetto al campionamento temporale (Dehghani et al. 2013).

2.5.5 Tecnica TomoSAR

La Tomografia SAR – TomoSAR- (Fornaro et al., 2014) è una tecnologia di processing che estende il metodo PSI per l'analisi dei pixel alla piena risoluzione del dato SAR. La tecnica introduce il concetto di focalizzazione

o *imaging*, che permette di ottenere immagini ad alta risoluzione spaziale, in quota nel contesto del SAR e dell'Interferometria SAR multi-passaggio. Rispetto alle tradizionali tecniche interferometriche, la Tomografia SAR sfrutta la disponibilità di passaggi multipli e ripetuti del sensore sulla stessa area per realizzare un'antenna virtuale lungo la direzione perpendicolare all'orbita del sensore (*range*), al fine di migliorare la capacità del sistema SAR di discriminare in quota i bersagli al suolo (*3D imaging*) (Fornaro et al., 2003). La tecnica effettua una sorta di "radar scanner" da satellite che, sintetizzando un'antenna dell'ordine di chilometri lungo la direzione di *range* (fisicamente irrealizzabile), permette di ricostruire il profilo tridimensionale della scena illuminata. Il principio di *imaging* in quota della Tomografia SAR è sfruttato per risolvere il problema di *layover*, descritto nel paragrafo 2.2. L'*imaging* in quota permette di "entrare" all'interno della cella di risoluzione delle immagini SAR per analizzare la distribuzione della retrodiffusione elettromagnetica e quindi rilevare la presenza di bersagli a quote diverse ma alla stessa distanza. Inoltre, in analogia alle tecniche interferometriche DInSAR, la Tomografia SAR sfrutta la diversità temporale dei dati acquisiti per implementare anche una funzione di misura dello spostamento attraverso l'*imaging* 4D (spazio + velocità) di ciascuno dei bersagli rilevati (Fornaro et al., 2009). Il dominio dell'*imaging* può essere ulteriormente esteso (*imaging* 5D) per monitorare anche i piccoli movimenti indotti dalla dilatazione termica delle strutture (Fornaro et al., 2013; Reale et al., 2013).

L'implementazione della Tomografia SAR alla massima risoluzione spaziale del dato permette di ottenere, grazie all'utilizzo dell'informazione di ampiezza, una più accurata stima dei parametri di interesse (tipicamente quota e spostamento) rispetto ad algoritmi interferometrici analogamente operanti alla massima risoluzione ma basati su approcci di tipo *Permanent Scatterer* (Ferretti, 2001). L'elaborazione tomografica multidimensionale permette, quindi, di localizzare nello spazio e di misurare nel tempo lo spostamento di ciascun elemento a terra che retrodiffonde il segnale SAR. L'informazione è restituita tipicamente in forma di una "nuvola" di punti (*point cloud*) georeferenziati (per ciascun punto sono fornite le 3 coordinate spaziali Est, Nord e Quota) che sono associati agli elementi maggiormente riflettenti.

L'elaborazione completa prevede un approccio a doppia scala spaziale, analogamente a quanto originariamente introdotto in (Lanari et al., 2004): il primo blocco, che opera con un set di interferogrammi mediati spazialmente, è costituito dall'elaborazione a bassa risoluzione implementata attraverso algoritmi di tipo Small-Baseline. Tali operazioni sono finalizzate a stimare e compensare (calibrare) gli errori di fase introdotti dalla propagazione in atmosfera del segnale radar, ma anche a stimare le componenti di spostamento non lineare a bassa risoluzione spaziale. Queste due componenti forniscono gli input necessari per la fase di calibrazione dei dati necessaria per l'implementazione della tecnica TomoSAR a piena risoluzione spaziale. La Tomografia SAR a piena risoluzione è implementata come descritto in (Fornaro et al., 2009), basata sull'utilizzo di un *Beamforming filter*, che misura la correlazione del vettore delle fasi misurate con un modello di fase che tiene conto dei parametri geofisici d'interesse.

2.6 DATI RESTITUITI DALL'INTERFEROMETRIA SATELLITARE

2.6.1 Tipologia del dato fornito

I risultati ottenuti dall'elaborazione interferometrica multi-temporale a piena risoluzione spaziale sono le mappe spazialmente estese di velocità media di spostamento e le serie temporali di spostamento per ogni punto coerente della scena e relativi all'intervallo temporale considerato nell'analisi interferometrica.

Per ogni punto di misura viene generalmente fornita la serie temporale degli spostamenti lungo la linea di vista del sensore (LOS), la velocità media di spostamento annuale lungo la stessa direzione, le coordinate geografiche (latitudine e longitudine) e la quota (solitamente rispetto a un riferimento globale) dei punti rispetto a un sistema di riferimento globale (e.g. WGS84). Ogni PS è associato ad un'area della superficie che dipende dalla misura della cella di risoluzione del dato SAR elaborato a piena risoluzione spaziale. Ad esempio, nel caso di utilizzo di dati ERS/ENVISAT, la cella di risoluzione è dell'ordine di 5x20m nelle direzioni *azimuth* e *range*; nel caso di dati CSK nella modalità Stripmap, la cella di risoluzione è di circa 3x3m; nel caso Sentinel-

1 (modalità TOPS), la risoluzione è di circa 15x4m. Sono disponibili per ciascun PS, inoltre, i coseni direttori della direzione della LOS, che permettono di identificare univocamente le componenti del versore LOS a cui fa riferimento il valore di spostamento fornito lungo le tre direzioni Est-Ovest (East-West, nel seguito E-W o E) Nord-Sud (North-South, nel seguito N-S o N) Verticale (Up, nel seguito U).

Infine, per ciascun punto viene fornito solitamente anche un parametro che indica la qualità e/o l'affidabilità dell'informazione di spostamento relativa a tale punto, usualmente denominato coerenza. Tale parametro, tuttavia viene valutato in modo differente a seconda della tecnica di analisi interferometrica che viene impiegata. Occorre perciò interpretare con attenzione i suoi valori, in funzione del significato specifico che tale parametro ha secondo la tecnica utilizzata (per dettagli fare riferimento al paragrafo 2.6.2).

A fini pratici e per poterne facilitare l'importazione in un software GIS, i prodotti interferometrici possono essere restituiti agli utenti finali come file ASCII strutturati, eventualmente suddivisi in matrici più piccole relative a sottoporzioni del dato originario ma contenenti ciascuna le stesse informazioni per la corretta interpretazione del dato DInSAR. Ciascuna matrice viene visualizzata come un quadrante, dove sono contenuti i punti per i quali è presente l'informazione in tale area. La suddivisione del database in quadranti ha solamente lo scopo di ridurre l'onere computazionale della procedura di elaborazione con cui viene effettuata l'analisi interferometrica. Nel caso siano disponibili più database, uno relativo all'orbita ascendente ed uno relativo all'orbita discendente, la suddivisione in quadranti nei due database può essere differente.

Si sottolinea, come già anticipato nei paragrafi precedenti, che tutte le misure fornite sono differenziali, ossia ottenute come differenza tra il valore registrato nel punto in esame e quello del *Reference Point*, fissato a priori e generalmente selezionato in un'area coerente dal punto di vista elettromagnetico e assunta stabile, ovvero nella quale vengono assunti nulli gli spostamenti. Inoltre, tutte le misure hanno un riferimento temporale corrispondente alla data della prima acquisizione.

La selezione del *Reference Point* durante l'elaborazione interferometrica è un procedimento che richiede particolare attenzione: la scelta dell'area coerente è legata al fatto che in questo modo vengono limitate le possibili fonti di rumore (effetti di decorrelazione) che potrebbero inficiare la qualità dei risultati.

La distanza del punto di riferimento dall'area di interesse può influenzare la precisione delle misure di spostamento e velocità media per quell'area. In generale, quindi, quanto più il punto di riferimento è prossimo al sito ove si vogliono operare le valutazioni, tanto più le misure saranno precise. In alcune tecniche si specifica che i valori forniti sono validi, con le precisioni indicate, solo ad una prefissata distanza dal punto di riferimento.

Un ulteriore aspetto da considerare è la stabilità del punto di riferimento: infatti, nel caso in cui tale punto sia soggetto a spostamenti nel tempo, le misure di spostamento associate a ciascun pixel del dataset potrebbero essere soggette a una errata sottostima/sovrastima del segnale di spostamento reale; pertanto, le serie temporali di spostamento dei punti del dataset dovranno essere depurate sottraendogli quella del punto di riferimento. Se viceversa il punto di riferimento è un caposaldo stabile dove non c'è presenza di spostamento lungo tutto l'arco temporale, questo problema non si verifica.

2.6.2 Coerenza, definizioni e impatto sulla interpretazione

Come detto precedentemente, per ciascun punto di misura viene fornito un parametro che contiene un'informazione sulla qualità e/o l'affidabilità della misura di spostamento relativa a tale punto, usualmente denominato *coerenza temporale*. La definizione di tale parametro è strettamente legata alla specifica tecnica DInSAR multi-temporale utilizzata e al tipo di elaborazione interferometrica, pertanto non è possibile fornire una sua definizione univoca.

In molti approcci di tipo PSI (Ferretti et al., 2001; Ferretti et al, 2011), la coerenza temporale è un indice che misura la corrispondenza tra il movimento del punto di misura e un certo modello analitico scelto a priori.

Facendo riferimento all'approccio SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale (Lanari et al., 2004; Bonano et al., 2012), la coerenza temporale è invece un parametro che fornisce una stima, per ogni singolo punto di misura, della qualità delle serie temporali di spostamento, attraverso la valutazione della similarità tra il segnale

deformativo arrotondato di partenza e il modello di fase adottato. Il valore della coerenza temporale è compreso tra 0 (nessuna similarità) e 1 (similarità massima) e i risultati DInSAR vengono selezionati sulla base di questo valore. In particolare, i pixel caratterizzati da un valore di coerenza più basso di una certa soglia, stabilita in base ad alcuni criteri specifici dell'analisi interferometrica, sono considerati non affidabili e vengono pertanto scartati nell'elaborazione SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale. La soglia di coerenza temporale viene selezionata empiricamente sulla base delle caratteristiche del dataset e dei sensori da elaborare, ad esempio il numero delle immagini SAR disponibili, l'estensione temporale dell'intero dataset SAR, la regolarità nel tempo delle acquisizioni, la presenza di eventuali "buchi" di acquisizioni dovuti a possibili malfunzionamenti di alcuni sensori, il tipo di area che si sta osservando (area urbana o area naturale con vegetazione), il tipo di dato che si è scelto. La soglia di coerenza non ha, quindi, un valore univoco nell'approccio interferometrico identificato, ma varia da elaborazione ad elaborazione. A titolo di esempio, nel caso di un dataset CSK composto da un centinaio (o anche più) di immagini SAR, acquisite con regolarità e senza buchi temporali significativi su un'area urbana (ad esempio una grande città come Roma o Milano) in un periodo di circa 10 anni, possiamo considerare una soglia di coerenza di 0.35 per i prodotti SBAS-DInSAR.

2.6.3 Distribuzione spaziale dei punti di misura

Osservando la rappresentazione su mappa dei punti di misura ottenuti con tecniche interferometriche multi-temporali a piena risoluzione spaziale, geocodificata e sovrapposta ad un'immagine ottica o ad una mappa cartografica, si può notare come essi siano tipicamente distribuiti su una griglia sparsa e addensati in prossimità di bersagli o strutture antropiche, quali edifici, infrastrutture, centri storici.

Dalla rappresentazione di questi ultimi su un supporto cartografico, è abbastanza comune identificare alcune aree prive di punti di misura. A titolo di esempio, si riportano sovrapposte in Figura 2.20 e Figura 2.21 le mappe di velocità di spostamento SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale ottenute elaborando un dataset ascendente (punti di misura verdi) e un dataset discendente (punti di misura rossi) per l'area di Roma, dove sono state indicate con un riquadro rosso due zone caratterizzate dall'assenza di punti di misura. Si sottolinea che, in generale, i punti dei due dataset ascendenti e discendenti non sono coincidenti e possono avere una distribuzione spaziale anche significativamente diversa, che dipende principalmente dal diverso punto di osservazione del satellite lungo le due orbite di acquisizione e dai differenti angoli di vista.



Figura 2.20 – Esempio di distribuzione spaziale dei punti di misura ottenuti dall'elaborazione interferometrica multi-temporale SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale di due dataset ascendenti (punti di misura verdi) e discendenti (punti di misura rossi) in un'area del centro storico di Roma. Il rettangolo rosso identifica un'area dove non sono stati rilevati punti di misura.



Figura 2.21 - Esempio di distribuzione spaziale dei punti di misura ottenuti dall'elaborazione interferometrica multi-temporale SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale di due dataset ascendenti (punti di misura verdi) e discendenti (punti di misura rossi) in un'area a Sud-Ovest di Roma. Il rettangolo rosso identifica un'area dove non sono stati rilevati punti di misura.

Le motivazioni alla base di tali osservazioni non risultano sempre univocamente identificate. In alcuni casi, come mostrato in Figura 2.20, la mancanza di punti di misura è presumibilmente legata alla quasi totale assenza di oggetti sufficientemente retrodiffondenti all'interno dell'area di interesse, in generale alla presenza di effetti di decorrelazione temporale (Zebker and Villasenor, 1992), come nel caso di superfici piatte e di aree vegetate (si veda anche paragrafo 2.2). In altri casi, invece, l'assenza di punti di misura non risulta giustificabile con tali motivazioni (Figura 2.21); infatti le cause non sembrano legate al meccanismo di *backscattering* degli oggetti osservati, ma piuttosto alla presenza di effetti di deformazione inattesi o difficilmente rappresentabili nell'algoritmo utilizzato, quali ad esempio carichi di traffico pesante, vento forte, repentini cambiamenti di temperatura, effetti vibrazionali secondari delle infrastrutture critiche come i ponti e i viadotti. Tali componenti possono generare delle anomalie nel segnale deformativo ottenuto con le tecniche DInSAR multi-temporali, che possono compromettere la corretta identificazione dello spostamento complessivo associato a singole strutture o a parti di esse. In questo caso, lo specifico algoritmo utilizzato nell'analisi DInSAR multi-temporale può portare all'esclusione di punti caratterizzati da un comportamento delle serie temporali di spostamento altamente variabile nel tempo e, di conseguenza, da valori decisamente bassi del parametro di coerenza temporale.

2.6.4 Precisione e accuratezza delle misure

La precisione dei risultati forniti delle tecniche interferometriche riguarda essenzialmente tre aspetti distinti: la georeferenziazione dei punti di misura, la determinazione delle velocità medie annuali di spostamento e la determinazione dei valori di spostamento che compongono le serie temporali. Si riportano di seguito alcune considerazioni su tali aspetti per alcune delle tecniche introdotte nel paragrafo 2.5.

2.6.4.1 Tecnica PSInSAR™

Per quanto riguarda la tecnica PSInSAR™ si riportano in Tabella 2.1 i valori di precisione associati ad una deviazione standard (1σ) con l'ipotesi di un dataset costituito da almeno 40 immagini e una distanza dal punto di riferimento inferiore a 2 km, per il caso di dataset derivanti da satellite ERS. In particolare, la operazione di georeferenziazione è distinta in due passaggi successivi: inizialmente si effettua una trasformazione di coordinate dalle coordinate SAR alle coordinate geografiche (e.g. GCS WGS 84), successivamente si effettua un allineamento dei PS sul supporto cartografico scelto mediante traslazione rigida. Per quanto riguarda il primo passaggio, il posizionamento del PS in direzione Nord-Sud risulta affetto da un errore con distribuzione di tipo uniforme compresa tra ± 2 m, mentre in direzione Est-Ovest risulta affetto da un errore con distribuzione normale a valor medio nullo e deviazione standard pari a circa 6 m (Figura 2.22).

Tabella 2.1. Precisione delle misure (1σ) per tecnica PsInSARTM con ipotesi di dataset di 40 immagini e distanza dal punto di riferimento inferiore a 2 km

Posizionamento del punto in direzione N-S	$\pm 2\text{ m}$
Posizionamento del punto in direzione E-W	$\pm 6\text{ m}$
Posizionamento del punto in quota (ellissoidica)	$\pm 1.5\text{ m}$
Velocità annua media di spostamento	$\pm 1\text{ mm/anno}$
Misure differenziali di spostamento	$\pm 5\text{ mm}$

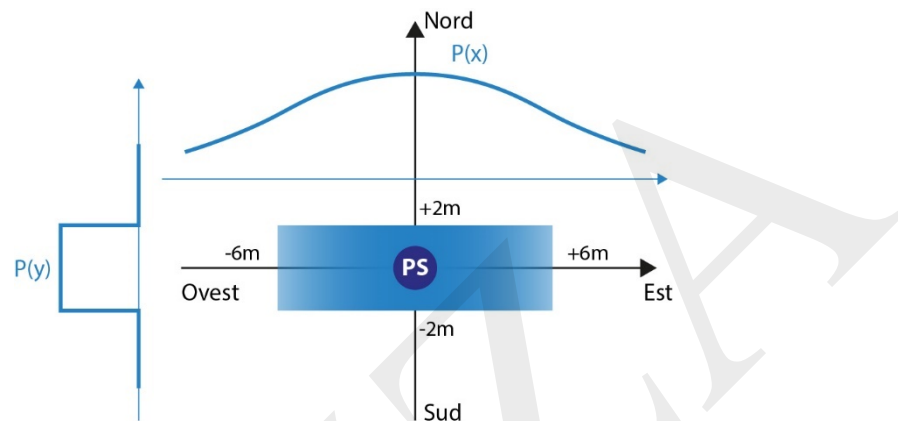


Figura 2.22 – Schematizzazione degli errori di posizionamento del PS, ripresa e riadattata da (TRE, 2008)

Per quanto riguarda la precisione sulla valutazione degli spostamenti dei PS, è utile ricordare che le principali cause che concorrono a degradare la stima di tali misure sono il disturbo atmosferico e il rumore di decorrelazione. Come accennato in precedenza, l'errore dovuto a tali fenomeni di disturbo tende a ridursi all'aumentare del numero di acquisizioni a disposizione. È importante notare come non sia possibile fornire una legge generale di propagazione dell'errore ed è necessario fare riferimento ai parametri di qualità (coerenza e deviazione standard) che vengono forniti per ogni PS. L'incertezza sulla velocità media annua è rappresentata in termini di deviazione standard per ogni PS, e tale valore dipende dalla distanza del singolo PS dal punto di riferimento (all'aumentare della distanza dal punto di riferimento aumenta la deviazione standard). Tuttavia, se si considerano due punti PS vicini tra loro, la loro velocità relativa ha invece una incertezza contenuta e inferiore a 1 mm/anno e risulta indipendente dalla distanza dal punto di riferimento. L'incertezza sulla serie di spostamenti è compresa tra $\pm 5\text{ mm}$ (si veda anche paragrafo 2.5.1).

2.6.4.2 Tecnica SBAS-DInSAR

Fatto salvo le distorsioni geometriche di cui si è parlato nel paragrafo 2.2 dovute alla tipica configurazione *side-looking* del radar (Franceschetti e Lanari, 1999), la georeferenziazione dei punti SAR è principalmente legata alla trasformazione del sistema di riferimento (da griglia radar a griglia geografica) e al ricampionamento della griglia geografica di output dei dati.

In particolare, se si analizzano localmente (in modo tale da poter trascurare gli effetti delle distorsioni suddette) le operazioni da effettuare per una corretta geolocalizzazione in pianta dei punti di misura, bisogna prima di tutto effettuare una trasformazione dalla griglia SAR (coordinate *azimuth* e *range*) alla griglia geografica (latitudine e longitudine in un sistema di riferimento globale, e.g. WGS84). Un esempio di tale trasformazione è riportato in Figura 2.23, dove la griglia rossa (corrispondente alla griglia dell'immagine Master utilizzata come riferimento per le operazioni di registrazione di tutte le immagini del dataset interferometrico e dipendente dalla risoluzione dei dati CSK di partenza) rappresenta la griglia radar di partenza nel caso di un dataset CSK acquisito in modalità Stripmap, mentre la griglia nera è la griglia geografica di output (coordinate

geografiche espresse in latitudine e longitudine), con una spaziatura regolare che dipende dal campionamento della griglia di uscita, ossia dalle cifre significative utilizzate per la sua rappresentazione.

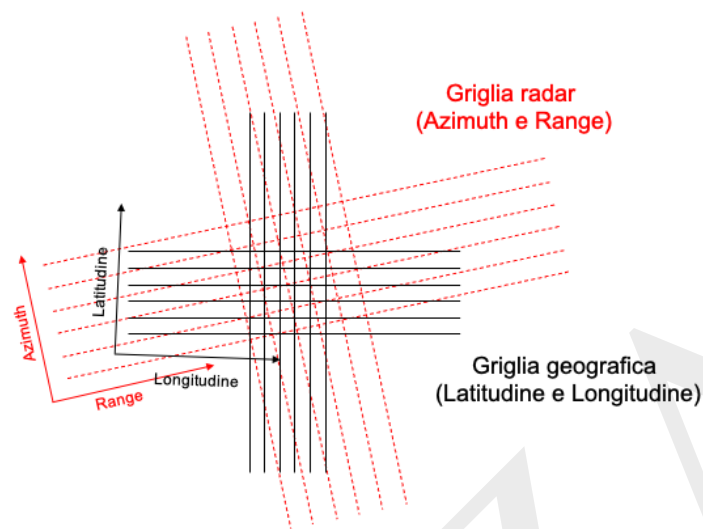


Figura 2.23 – Effetto della trasformazione dalla griglia SAR (coordinate azimuth-ground range) alla griglia geografica di output (latitudine e longitudine) durante l'operazione di geocodifica dei punti di misura.

Un particolare aspetto che influisce sulla precisione nella geolocalizzazione dei punti di misura in pianta è legato alla stima di topografia residua rispetto al DEM utilizzato nell'elaborazione interferometrica. Infatti, la precisione del posizionamento in pianta del punto di misura dipende dalla qualità della ricostruzione della quota di ciascun punto rispetto al sistema di riferimento globale, che a sua volta dipende dall'accuratezza della stima della componente di fase topografica residua rispetto al DEM utilizzato nel processing interferometrico. Per quanto riguarda la tecnica SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale (Lanari et al., 2004; Bonano et al., 2012) si riportano in Tabella 2.2 i valori di precisione corrispondenti ad una deviazione standard (1σ) nel caso di elaborazione di un dataset CSK (con oltre 100 immagini) a piena risoluzione spaziale (circa 3mx3m nella griglia in *ground range*) e angolo di vista (*look angle*) medio di circa 33° .

Tabella 2.2. Precisione delle misure (1σ) per la tecnica SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale applicata a dati COSMO-SkyMed con *look angle* di circa 33°

Posizionamento del punto in direzione N-S	$\pm 1 - 2 m$
Posizionamento del punto in direzione E-W	$\pm 2 - 3 m$
Posizionamento del punto in quota	$\pm 1 - 2 m$
Velocità annua media di spostamento	$\pm 1 - 2 mm/anno$
Misure differenziali di spostamento	$\pm 5 - 10 mm$

Pertanto, nel caso di un dataset interferometrico CSK con risoluzione di circa 3x3m, è possibile assumere che la precisione nel posizionamento del punto di misura (una deviazione standard) sia di circa 1-2 m, 2-3 m e 1-2 m in direzione North-South, East-West e Verticale, rispettivamente.

È importante sottolineare, però, che essendo le misure interferometriche differenziali, cioè calcolate rispetto al *Reference Point*, l'incertezza nel suo posizionamento ha un impatto diretto su tutti i punti del dataset. Di conseguenza, tutti i punti possono essere affetti da un *bias* rigido corrispondente ad una traslazione rigida, lungo tutte e tre le direzioni dello spazio, dei punti di misura. Questo errore può essere compensato facendo uso di strumenti a terra come *corner reflectors* in corrispondenza dei quali sia stata installata una stazione GPS.

Infine, per quanto riguarda la precisione delle misure di spostamento dei punti di misura ottenuti (Tabella 2.2), l'approccio SBAS-DInSAR permette di ottenere una precisione di $\pm 1-2$ mm/anno sulle misure di velocità media di spostamento e di ± 5 mm sulle singole misure di spostamento (Casu et al., 2006; Bonano et al., 2013; Manunta et al., 2019), si veda anche paragrafo 2.5.1.

2.7 STRUMENTI DIGITALI DI SUPPORTO ALL'INTERPRETAZIONE DEI DATI INTERFEROMETRICI

Nel presente paragrafo vengono introdotti alcuni prodotti cartografici e topografici che possono essere adoperati per facilitare l'utilizzo e l'interpretazione dei dati interferometrici e, in particolare, l'interpretazione della posizione dei punti di misura. Sono analizzate due categorie di prodotti:

- Strumenti cartografici derivati da telerilevamento aereo e satellitare
- Prodotti derivati da rilievi o telerilevamento in sito

Questi sono prodotti utili per confrontare la posizione dei punti di misura rispetto a quella di altre entità. Occorre però sottolineare che ciascuno di questi prodotti è caratterizzato da una diversa precisione. Tra quelli considerati, soltanto i rilievi on site effettuati con stazione totale o GPS permettono di ottenere dati georeferenziati con una precisione sufficiente per essere assunti come elementi di riferimento.

2.7.1 Prodotti cartografici da telerilevamento aereo e satellitare Ortofoto e immagini georiferite

Le ortofoto sono elaborazioni di immagini rilevate da sensori posti su aereo o satellite che hanno subito un raddrizzamento dal punto di vista geometrico in modo da diventare delle proiezioni ortogonali. Esse possono essere utilizzate come carte geografiche poiché georiferite, cioè riferite ad una specifica estensione entro un sistema di riferimento geografico o cartografico. Numerosi enti pubblici e privati forniscono ortofoto del territorio italiano o anche solo immagini (riprese oblique e non trattate per diventare proiezioni ortogonali) comunque trattate in modo da diventare carte geografiche. Offrono servizi di questo tipo il Geoportale Nazionale, Bing Maps Portal, Google Maps, Google Earth. Molti sono gli operatori che offrono servizi di tipo commerciale in questo settore e propongono immagini o ortofoto anche con risoluzioni a terra molto elevate: ad esempio ora è possibile raggiungere risoluzioni di pochi cm. In Figura 2.24 vengono mostrate due mappe realizzate con i servizi del Geoportale Nazionale (ortofoto) e di Bing Maps Portal (immagine georiferita).

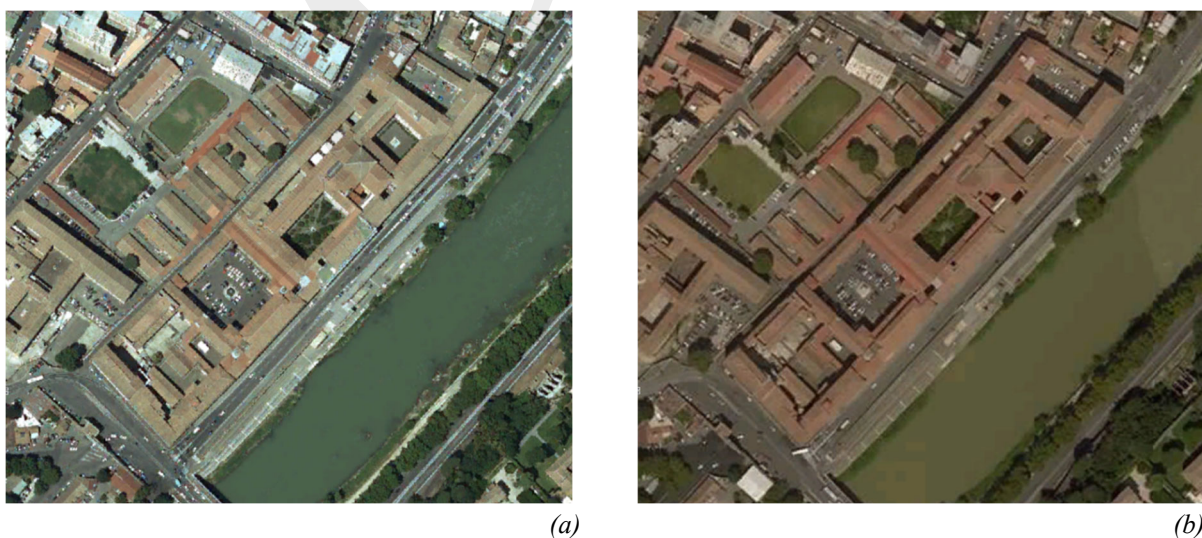


Figura 2.24 – Esempio di ortofoto ed immagini utilizzabili come mappe: Complesso di San Michele a Ripa Grande, Roma rappresentato da: (a) Ortofoto 2012 disponibile al servizio WMS del Geoportale Nazionale; (b) Immagine presente nelle mappe Bing Aerial Maps fornite da Bing Maps Portal.

Mappe tematiche:

Esistono diverse mappe tematiche che forniscono informazioni georeferenziate utili all'analisi e alla gestione del territorio e che possono essere affiancate alle misure di velocità e spostamento fornite dall'interferometria satellitare. Ad esempio, il servizio WMS del Geoportale Nazionale (WMS-Geoportale, sito web) fornisce dati e mappe utili all'identificazione del rischio idrogeologico, idraulico, sismico e all'analisi dei processi deformativi che interessano il territorio, come ad esempio il catalogo frane.

Quote planimetriche, altimetriche e volumetrie di edifici

Le regioni italiane realizzano prodotti cartografici fin dagli anni settanta e nel tempo hanno adottato regole e tecnologie differenti. Negli ultimi decenni hanno realizzato prodotti di cartografia digitale abbastanza simili fra loro perché uniformi agli indirizzi ed alle regole tecniche definite in sede sovregionale (IntesaGIS, CISIS), nazionale (Agenzia per l'Italia Digitale o AGID) e comunitaria (INSPIRE). La carta tecnica principale attualmente prodotta dalle regioni è il database geotopografico, che è realizzato secondo le specifiche di contenuto previste da AGID. Il database geotopografico (DBGT), di cui fa parte la CTRN (Carta Tecnica Regionale Numerica), prevede la descrizione del territorio nei principali aspetti naturali e antropici attraverso classi di elementi ai quali vengono associati degli attributi alfanumerici: ogni classe contiene elementi dello stesso tipo, per ciascun elemento vengono definite proprietà geometriche (la collezione delle coppie di coordinate) e lo stato rispetto agli attributi alfanumerici; proprietà geometriche e attributi vengono utilizzate per rappresentare gli aspetti del territorio o per produrre ulteriori artefatti. Alcune di queste classi di elementi si prestano a produrre artefatti utili per il confronto con il dato interferometrico. Esse riguardano: le informazioni geodetiche, le infrastrutture di viabilità, gli immobili ed i manufatti, l'idrografia. Si tratta, in particolare, di classi di elementi per i quali vengono specificati, oltre alla quota planimetrica, la quota altimetrica ed eventuali altri riferimenti che possono essere utilizzati per eseguire operazioni di modellazione. Fra queste classi di elementi va ricordata in particolare quella relativa alle unità volumetriche: per questi elementi sono note sia le quote planimetriche e altimetriche (nelle geometrie) sia la quota dell'estrusione (negli attributi). È così possibile ottenere una schematizzazione del volume dell'edificio attraverso prismi ottenuti estrudendo nella direzione verticale l'ingombro in pianta di ciascuna porzione di edificio. Rappresentazioni simili si possono ottenere costruendo manualmente i prismi ricavando le altezze degli edifici da altre fonti, come per esempio il servizio Google Earth. Negli ultimi anni iniziano ad essere disponibili modelli tridimensionali di volumetria degli edifici di intere città secondo diversi formati, tra i quali si cita CityGML (City Geography Markup Language) che, basato su XML, rappresenta uno standard internazionale la modellazione e l'interscambio di dati 3D su città. In particolare, CityGML rappresenta un information model comune per la rappresentazione di oggetti urbani tridimensionali.

Alternativamente, nel caso in cui sia necessaria una descrizione più accurata dell'ingombro tridimensionale del manufatto, è possibile ottenere ricostruzioni ad elevato grado di dettaglio attraverso un rilievo con laser-scanner, come discusso nei paragrafi successivi.

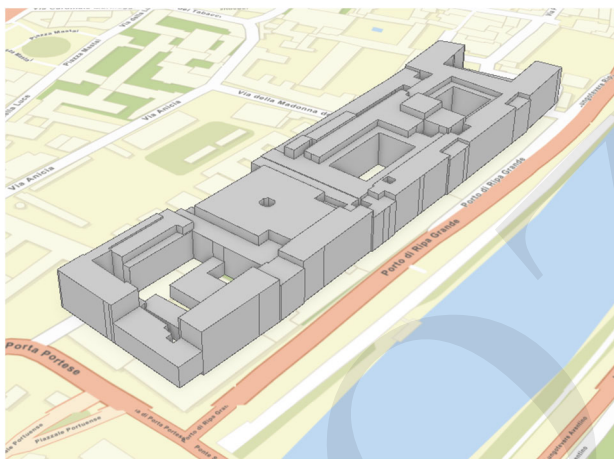
Nella Figura 2.25 (a) è illustrato un confronto sulla rappresentazione del volume di un edificio realizzata con dati provenienti da fonti differenti. Il volume in Figura 2.25 (b) è stato ottenuto usando i dati presenti nel database geotopografico realizzato dalla Regione Lazio nel 2014, mentre quello in Figura 2.25 (c) è stato costruito ricavando le altezze da Google Earth. Si nota una incongruenza nel volume al centro del cortile interno, che deve essere corretta. In generale i dati forniti da database geotopografico sono sufficientemente corretti, ma un controllo da parte dell'utente è comunque consigliato, almeno per i manufatti di principale interesse nell'analisi.

Le precisioni relative all'ingombro in pianta degli edifici sono diverse a seconda del prodotto cartografico da cui sono ricavati. Tali prodotti sono spesso stati realizzati per scopi differenti e con differenti livelli di accuratezza, l'accuratezza è piuttosto uniforme per tipologia di prodotto cartografico ma è specificata nel capitolato (e nel protocollo di collaudo) con il quale viene affidata la realizzazione della carta. In prevalenza i database geotopografici sono realizzati per produrre cartografia in scala 1:5000 e l'accuratezza delle coordinate

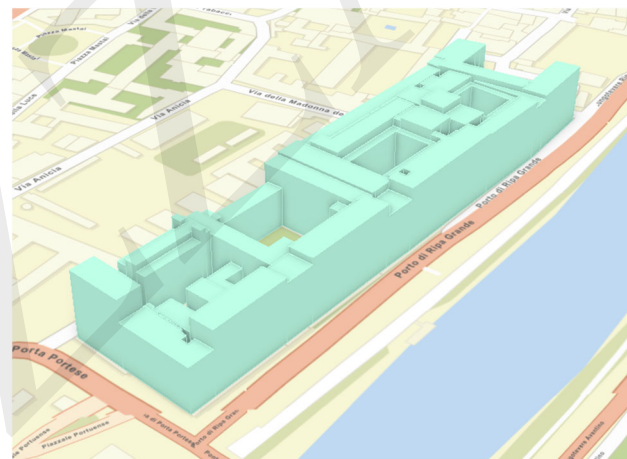
planimetriche è di ± 1 m mentre quella relativa alla quota altimetrica è in genere compresa fra $\pm 1,5$ metro e ± 2 metri. In ogni caso è opportuno verificare l'accuratezza delle due quote dichiarata nei capitolati di esecuzione dei lavori.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.25 – Esempio di rappresentazione tridimensionale di un edificio: Complesso di San Michele a Ripa Grande, Roma rappresentato da: (a) Servizio Google Earth; (b) Schematizzazione a prismi con dati ricavati dal database geotopografico della Regione Lazio del 2014; (c) Schematizzazione a prismi con dati ricavati da Google Earth

Modelli digitali di elevazione (DEM):

I modelli digitali di elevazione (DEM, Digital Elevation Model) sono prodotti che permettono di rappresentare l'elevazione dei punti di una certa area, considerando o meno la presenza degli edifici e della vegetazione. In particolare, si parla di *modelli digitali del terreno* (DTM, Digital Terrain Model) quando viene descritto l'andamento della superficie terrestre senza alcun elemento che si eleva dal livello del terreno. Quando invece il modello di elevazione include anche la presenza di edifici, vegetazione, o qualsiasi altro elemento che si eleva dal livello del terreno, si parla di *modello digitale di superficie* (DSM, Digital Surface Model), McGlone, 2007.

La maggior parte dei DEM a scala regionale sono prodotti a partire dai dati ottenuti da scansione laser aerea (ALS), LiDAR (*Light Detection And Ranging*) o fotogrammetria aerea. Questa classe di DEM è caratterizzata da risoluzioni elevate (5m in pianta) e buone precisioni dei valori dell'elevazione (1 – 2m), Thenkabail, 2015. I DEM realizzati a scala globale permettono di descrivere l'intera superficie terrestre, ma risentono di una precisione e di una risoluzione inferiori (Thenkabail, 2015). Alcuni esempi sono il DEM derivato dal progetto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) USGS, sito web, il DEM ASTER – GDEM (NASA-JET, sito

web) e il DEM realizzato dalla missione TanDEM-X, sito web. Un DEM realizzato a scala europea è quello prodotto dal progetto Copernicus (EU-DEM v1.1, sito web).

Nella Tabella 2.3 ripresa da Thenkabail, 2015, sono riportate le risoluzioni e le precisioni nella definizione della quota di alcuni DEM disponibili.

Tabella 2.3. Risoluzione e precisione di alcuni DEM disponibili, ripresa da Thenkabail, 2015

DEM	Risoluzione spaziale	Precisione verticale assoluta
ALS	< 1 m x 1 m	< 1 m
Airborne InSAR DEMs (e.g. NextMap)	5 m x 5 m	< 2 m
ASTER GDEM V2 and World30	30 m x 30 m	< 20 m
SRTM DTED-1	90 m x 90 m (3 arcsec)	< 30 m
SRTM DTED-2	30 m x 30 m (1 arcsec)	< 18 m
TanDEM-X DEM; WorldDEM	12 m x 12 m (0.4 arcsec)	< 10 m

In alternativa ai prodotti già realizzati, è possibile generare un DEM a partire da un gruppo di punti quotati, ricavando una superficie interpolante che descrive l'andamento dell'elevazione in una zona. Per alcune zone del territorio nazionale sono disponibili pacchetti di dati che descrivono l'andamento del terreno per punti quotati, spesso definiti con precisioni analoghe a quelle usate per la creazione dei prodotti della CTR.

I DEM sono usualmente forniti attraverso uno dei seguenti formati:

- Immagini raster
- Reti triangolari irregolari (TIN, Triangulated irregular networks)

I formati raster sono i più diffusi e hanno il vantaggio di essere leggeri e agevoli da utilizzare. Infatti, contengono unicamente un'informazione di elevazione su un reticolo di pixel di dimensioni costanti, McGlone, 2007. Le rappresentazioni TIN sono costituite da vertici posizionati nello spazio uniti da linee rette, a formare una superficie costituita da elementi triangolari. Rispetto alle immagini raster, le rappresentazioni TIN permettono una descrizione più efficiente della superficie terrestre, in quanto la maglia si infittisce nelle zone ad andamento più complesso e si allarga in quelle ad andamento più uniforme. Per contro, per ciascun punto del reticolo sono fornite le tre coordinate spaziali necessarie a individuarlo.

I valori dell'elevazione sono ormai definiti quasi esclusivamente rispetto a un riferimento globale, di tipo geoidico o ellissoidico.

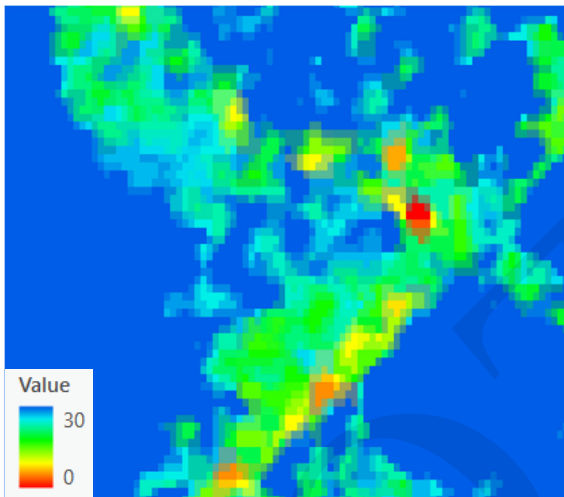
Utilizzando un DEM abbinato alla visualizzazione dei punti di misura si ha il vantaggio di avere una indicazione di dove è il livello del terreno. Occorre tenere presente però che ciascun DEM è caratterizzato da una certa risoluzione e precisione.

In Figura 2.26 è presentato il confronto tra due DEM utilizzati per descrivere la superficie del terreno in una zona di Roma. In Figura 2.26(a) è rappresentata la condizione in cui non viene utilizzato un DEM. I risultati di Figura 2.26(b) sono ottenuti utilizzando il DEM SRTM 1 arc-sec, avente risoluzione di circa 30mx30m e incertezza delle quote inferiore a 18m. Nell'immagine di sinistra si nota come tale precisione non sia sufficiente a descrivere correttamente l'orografia della zona. La Figura 2.26(c) è stata ricavata utilizzando un DEM costruito a partire da un set di punti quotati disponibile tra i prodotti della CTR della Regione Lazio, 2002 (sito web). La risoluzione è di 5m x 5m e la precisione in quota è la medesima degli altri prodotti CTR, pari a $\pm 2m$. La rappresentazione della superficie del terreno è migliore rispetto a quella ottenuta con il DEM SRTM.

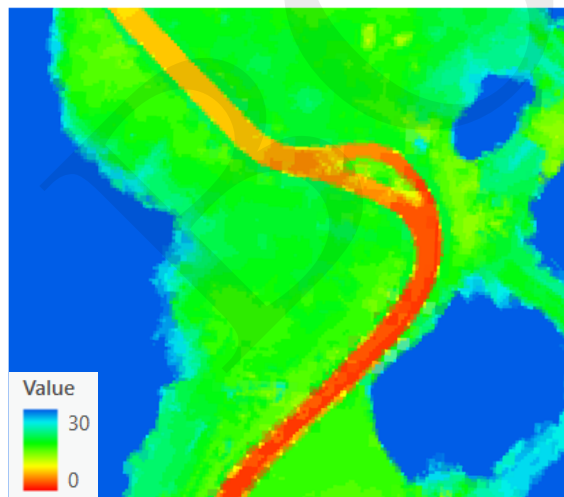
In generale, occorre tenere in considerazione che la superficie descritta da un DTM non può essere assunta a priori come l'esatta posizione del livello del terreno, ma è necessario adottare una tolleranza legata alla precisione con cui sono definiti i valori di elevazione.



(a)



(b)



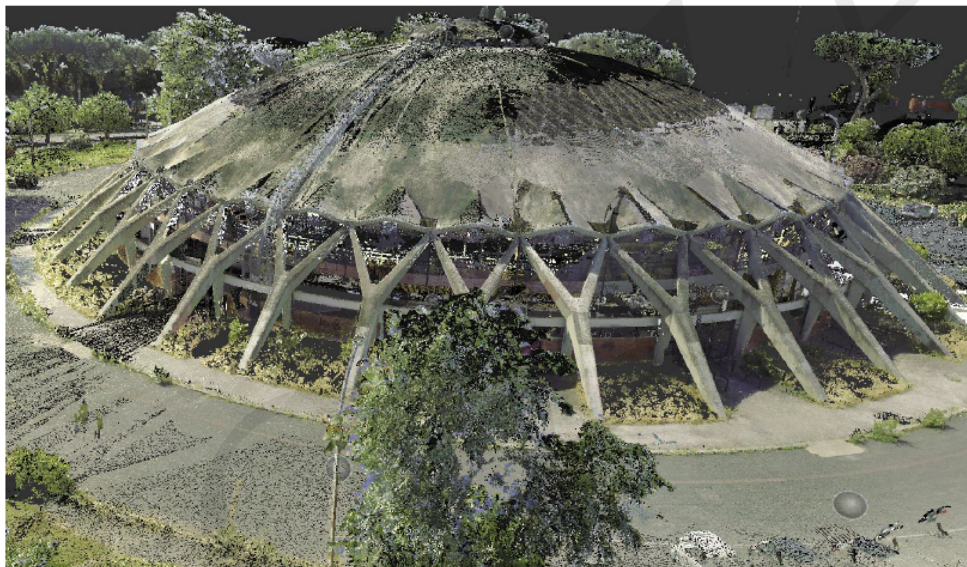
(c)

Figura 2.26 – Esempio di confronto fra due DTM per la rappresentazione del terreno nella zona del complesso San Michele a Ripa Grande, Roma. Nelle immagini a sinistra è rappresentato l'andamento delle quote del terreno secondo una scala di colori; a destra è illustrata la superficie del terreno ottenuta, in vista assonometrica: (a) vista in assenza di un DTM; (b) vista utilizzando il DEM SRTM 1 arc-sec; (c) vista utilizzando un DTM generato da un pacchetto di punti quotati con risoluzione 5mx5m fornito dalla Regione Lazio.

2.7.2 Prodotti ottenuti da rilievi o telerilevamento in sito

I metodi tradizionali per il rilievo in sito di edifici, con una storia ormai consolidata da decenni, sono quelli che prevedono l'utilizzo di strumenti quali il teodolite o la stazione totale. Questi strumenti, nelle varie versioni più o meno evolute, hanno sostanzialmente la caratteristica di ottenere pochi punti nello spazio con una precisione elevatissima, pochi millimetri, su una distanza anche di qualche chilometro. Il numero di punti è stabilito dall'operatore che individua, nell'oggetto da rilevare, le informazioni necessarie per poi ottenere una rappresentazione in grado di soddisfare il livello di dettaglio richiesto. I prodotti elaborati possono essere principalmente bidimensionali, con l'individuazione di piante, prospetti o sezioni, o tridimensionali con l'obiettivo di valutare principalmente il volume del fabbricato da rilevare.

I metodi più avanzati di rilievo, in tempi recenti resi molto più accessibili rispetto a qualche anno fa, utilizzano strumenti con sensori laser scanner. Tali strumenti consentono il rilevamento tridimensionale di oggetti a scale e risoluzioni differenti in modo automatico, creando superfici quasi continue dell'oggetto rilevato. Alcuni esempi di restituzione di questi metodi sono riportati in Figura 2.27.



React Studio: Laser Scanning Palazzetto dello sport a Roma

(a)



(b)

Figura 2.27 – Esempi di restituzione dei risultati ottenuti da rilievo laser scanner: (a) Laser Scanning Palazzetto dello Sport, Roma (React Studio); (b) Viadotto dell'industria sul fiume Basento, Candela et al. 2020

Il prodotto generato dal laser scanner è una “nuvola di punti”, anche con informazioni sul colore rilevato, che interconnesse con più stazioni consentono di restituire in modo molto dettagliato un modello tridimensionale completo. La mole di dati ottenuti è chiaramente molto importante e quindi per eseguire certe elaborazioni occorre una dotazione hardware adeguata. Inoltre, alcuni dati devono essere correttamente interpretati per via della possibile presenza di zone d'ombra durante il rilievo, di problemi legati alla rifrazione di alcuni elementi

o della possibilità che oggetti e/o persone possano trovarsi, e quindi essere rilevati, in posizioni differenti nelle varie stazioni. A fronte di queste problematiche, comunque facilmente superabili, il rilievo laser scanner rimane il metodo più avanzato, completo e preciso disponibile e con la tecnologia GPS è ad oggi possibile geolocalizzare e referenziare le nuvole di punti in un sistema DEM.

2.8 RAPPRESENTAZIONI GRAFICHE DEI DATI RESTITUITI DALL'INTERFEROMETRIA SATELLITARE

Le rappresentazioni grafiche possono essere fatte sia per le grandezze dirette (es. spostamenti lungo la LOS) che per grandezze derivate che si ottengono a valle di elaborazioni (es. spostamenti lungo la verticale). Per il dettaglio di come si ottengono le grandezze derivate si veda il capitolo 3.

2.8.1 Rappresentazioni su diagrammi

Vi sono diverse tipologie di rappresentazioni possibili su diagramma dei dati restituiti dal processo interferometrico, sia 2D che 3D. Di seguito si riportano alcuni possibili esempi relativi alla rappresentazione delle grandezze dirette, non elaborate.

Esempi di rappresentazioni su diagramma di grandezze derivate, per le quali si rimanda al capitolo 3, possono essere:

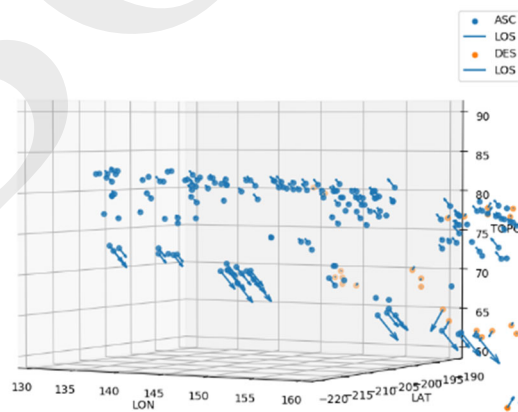
- Serie temporale dello spostamento lungo la verticale
- Rappresentazione nel dominio delle frequenze
- Entropia nel tempo, etc.

Si riportano di seguito alcuni esempi di rappresentazioni su diagramma di grandezze dirette.

L'andamento degli spostamenti lungo la LOS nel tempo è rappresentabile per ciascun punto attraverso un grafico che riporta in ascissa le date di acquisizione e in ordinata l'entità dello spostamento (i.e. diagramma della serie di spostamento del punto di misura, si veda ad esempio Figura 3.9a).

La velocità media annua di spostamento viene valutata come la pendenza della retta di regressione lineare della funzione spostamento. Per associare un grafico di questo tipo a ciascun punto è necessario utilizzare un software dotato di uno strumento adeguato che fornisca tale rappresentazione (ad esempio, plugin PSViewer di QGIS, TRE toolbar per ArcGIS).

Altre possibili rappresentazioni su diagramma sono ad esempio rappresentazioni vettoriali delle velocità medie lungo la LOS, come ad esempio riportato in Figura 2.29.



(a)

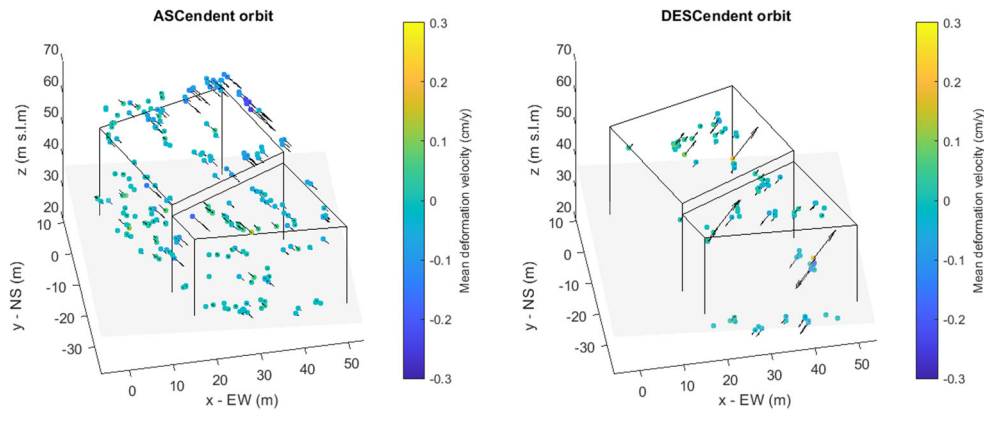


Figura 2.28 – Esempi di rappresentazione di vettori di velocità lungo la LOS: (a) acquedotto Claudio, Roma; (b) edificio in via Mameli, Roma

2.8.2 Rappresentazioni su mappe

In questo paragrafo vengono descritte le principali possibili rappresentazioni su mappa delle informazioni fornite per i punti di misura. Si tratta di mappe (con vista 2D e/o 3D) che si possono realizzare plottando il valore di una variabile puntuale (ad esempio tramite una scala di colori, tramite vettori, etc.) per un set di punti. Ad esempio per le grandezze dirette si possono rappresentare:

- Mappe di velocità media di spostamento lungo la LOS
- Mappe di spostamento lungo la LOS (per un determinato istante temporale)
- Mappe della coerenza

mentre per le grandezze derivate (si veda capitolo 3):

- Mappe di gradiente di spostamento (per un determinato istante temporale)
- Mappe dell'entropia spettrale

Per ciascuna variabile visualizzata nelle mappe (velocità media lungo la LOS, spostamento lungo la LOS in un dato istante, etc.) è necessario definire la scala di colori convenzionale che si utilizza. A titolo di esempio, la scelta dell'intervallo di valori tra cui visualizzare la scala di velocità necessita di particolare attenzione in quanto bisogna tenere conto della precisione delle velocità medie, si veda il paragrafo 2.6.4. Tale aspetto è da considerare anche nella sensibilità della scala scelta nel caso di scale graduate discrete in quanto ogni singola classe discreta è caratterizzata da un intervallo di velocità media che è selezionato dall'utente: intervalli troppo ridotti possono non essere compatibili con la precisione dei dati SAR, mentre intervalli troppo elevati potrebbero non essere sufficienti per analizzare i fenomeni deformativi delle strutture a cui si è interessati. Nel visualizzare i punti ottenuti dall'interferometria assieme agli strumenti digitali di supporto è inoltre necessario tenere conto degli errori di posizione, si veda il paragrafo 2.6.4.

In Figura 2.29 è riportato un esempio di rappresentazione della velocità media lungo la LOS visualizzando punti contenuti in diversi quadranti (Area di Roma con elaborazione SBAS, si veda Appendice 1).

In Figura 2.30 è riportato un esempio di rappresentazione della coerenza per un quadrante, mentre in Figura 2.31 sono riportate le mappe di coerenza per uno specifico quartiere e per un singolo edificio.

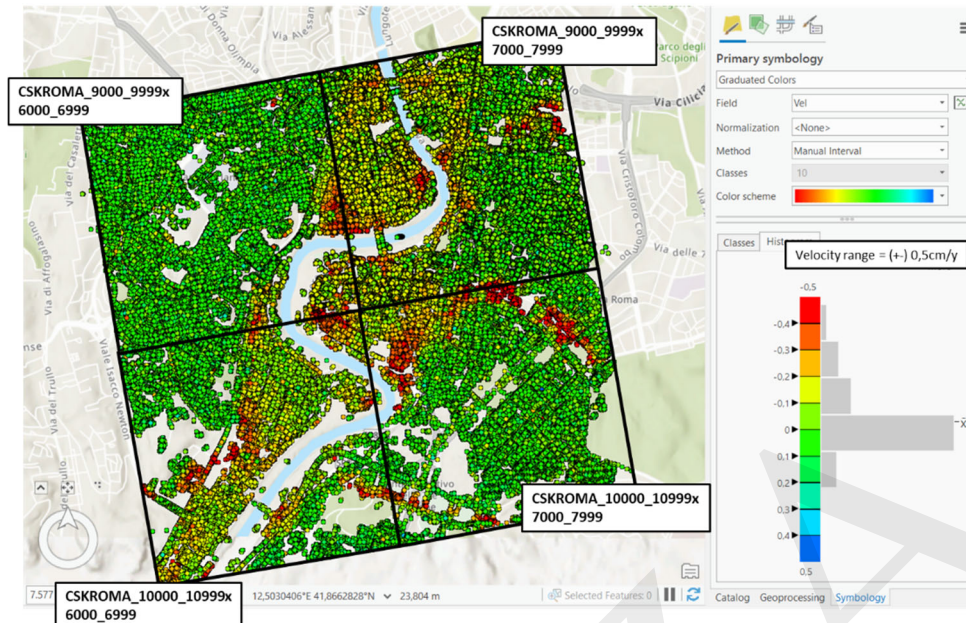


Figura 2.29 – Esempio di rappresentazione della velocità media lungo la LOS visualizzando punti contenuti in quadranti adiacenti (Area di Roma con elaborazione SBAS, Appendice 1)

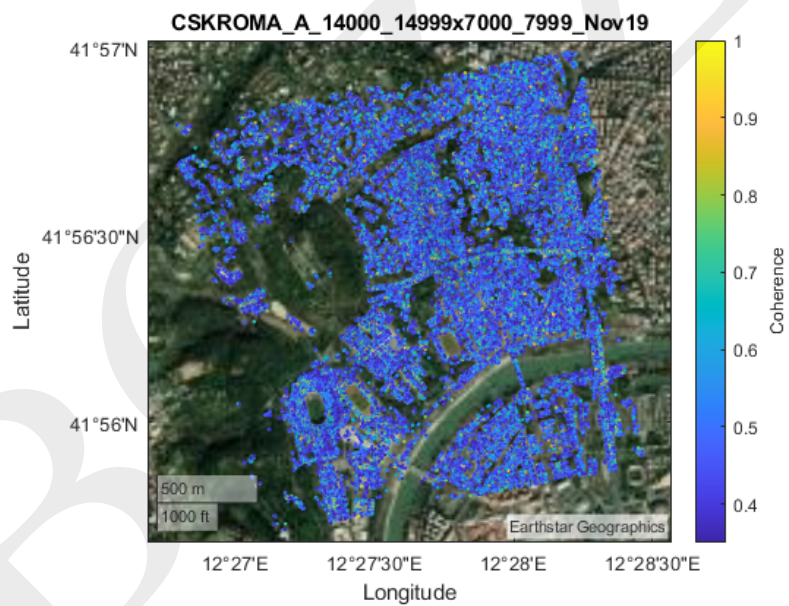


Figura 2.30 – Esempio di rappresentazione della coerenza a scala territoriale

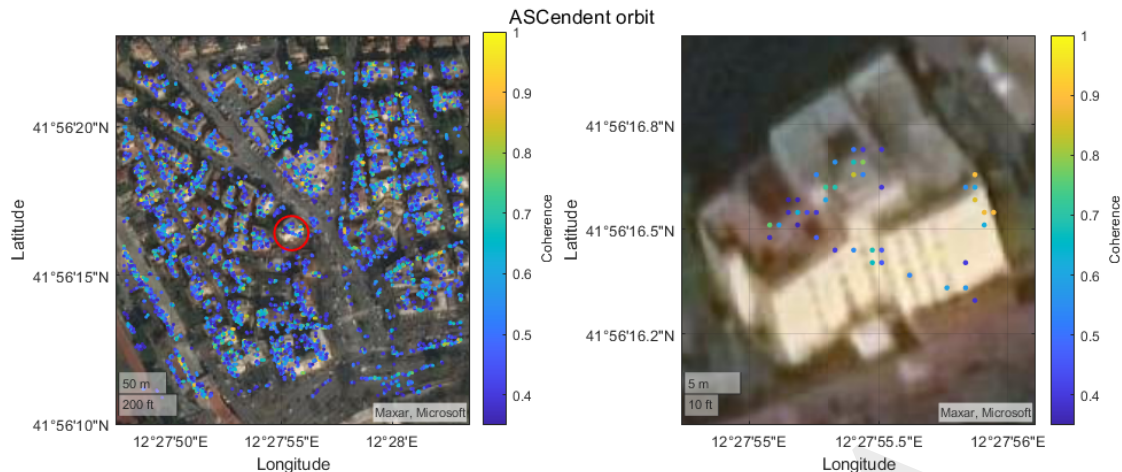


Figura 2.31 – Esempio di rappresentazione della coerenza a scala quartiere ed a scala edificio

2.9 SINTESI DEL CAPITOLO E ASPETTI CHIAVE

Il presente capitolo è dedicato a fornire un quadro sintetico degli aspetti più significativi relativi ai dati SAR (*Synthetic Aperture Radar*) da satellite e alle tecniche multi-temporali di Interferometria SAR satellitare, essenziali per un utilizzo consapevole, da parte anche di utenti non specialisti in Interferometria SAR satellitare, dei dati restituiti da tali tecniche (e.g. serie temporali di spostamento, mappe di velocità media di spostamento). Il fine è la corretta valutazione del fenomeno deformativo in esame e l'interpretazione del comportamento delle strutture e delle costruzioni.

Il SAR è un sistema attivo a microonde capace di acquisire immagini della superficie terrestre sia di giorno che di notte, con qualunque condizione atmosferica. Le immagini SAR sono rappresentate nelle coordinate *azimuth* e *range* che rappresentano, rispettivamente, la direzione di volo e la direzione di vista, solitamente ortogonale alla direzione di volo (cfr. paragrafo 2.2). La risoluzione spaziale di un'immagine SAR satellitare è di pochi metri in entrambe le direzioni e dipende dalla banda del segnale elettromagnetico trasmesso e dalla lunghezza dell'antenna utilizzata.

Essendo un sistema *side-looking*, il SAR è affetto dalle distorsioni geometriche, denominate *foreshortening*, *layover* e *shadowing*, che rendono geometricamente differente un'immagine SAR dalla sua omologa immagine ottica, per dettagli su questi fenomeni si rimanda al paragrafo 2.2, ed in particolare alla Figura 2.10.

I sensori SAR maggiormente utilizzati per applicazioni civili a partire dal 1992 sono: ERS-1/2, ENVISAT, COSMO-SkyMed e Sentinel-1. È stato recentemente lanciato il primo satellite della costellazione COSMO-SkyMed *Second Generation*, in continuità con la prima generazione COSMO-SkyMed, che andrà a potenziare enormemente i sistemi disponibili dell'Agenzia Spaziale Italiana.

L'Interferometria SAR differenziale (DInSAR) consente di estrarre informazioni sullo spostamento degli elementi presenti sulla superficie terrestre e/o della superficie terrestre stessa. La tecnica DInSAR, sfruttando la differenza di fase tra due immagini SAR, acquisite dal satellite sulla stessa area in tempi diversi (*baseline temporale*) e da posizioni orbitali leggermente diverse (*baseline spaziale*), consente di ricavare la misura dello spostamento, in termini di avvicinamento o allontanamento dal sensore. La differenza di fase tra due immagini SAR dà luogo al cosiddetto interferogramma o frange interferometriche, un'immagine bidimensionale nel piano *range* e *azimuth* rappresentata con una serie di frange. L'accuratezza con cui è possibile misurare gli spostamenti superficiali è pari ad una frazione della lunghezza d'onda alla quale opera il sensore SAR (alcuni cm), per cui è possibile raggiungere teoricamente accuratissime nella valutazione di spostamenti anche di pochi millimetri, che tuttavia richiedono lunghe e complesse fasi di elaborazione.

Per superare le limitazioni della tecnica DInSAR "convenzionale", sono state sviluppate tecniche DInSAR avanzate multi-temporali, capaci di fornire informazioni accurate sull'evoluzione temporale degli spostamenti superficiali, attraverso la generazione di serie temporali di spostamento e di mappe di velocità media di

spostamento. Tali approcci si basano sull'utilizzo di grandi dataset, costituiti spesso da centinaia di immagini SAR e di interferogrammi differenziali relativi alla stessa area, che sono opportunamente combinati per ricavare informazioni sull'evoluzione temporale degli spostamenti superficiali. Nonostante la notevole complessità algoritmica e i tempi di calcolo decisamente più lunghi, l'informazione ottenuta negli approcci multi-temporali porta ad un notevole miglioramento dell'accuratezza delle misure di spostamento.

Le tecniche DInSAR multi-temporali possono essere raggruppate in due grandi categorie: gli approcci *Persistent Scatterer* (PS) e *Small Baseline* (SB). Nelle tecniche PS si assume la presenza di un solo scatteratore dominante ritenuto coerente per tutto l'intervallo di tempo di osservazione. Le tecniche PS generalmente fanno uso di interferogrammi generati senza alcun vincolo sulle baseline temporali e spaziali. Le tecniche SB, invece, si basano sull'assunzione di *scattering* spazialmente distribuito all'interno della cella di risoluzione, portando come immediato vantaggio che la densità dei punti che possono essere rilevati nelle analisi interferometriche SB aumenta notevolmente rispetto ai metodi PS. Al fine di limitare le sorgenti di rumore, negli approcci SB viene imposto un valore massimo nelle baseline spaziali e temporali delle coppie interferometriche utilizzate, limitando così i problemi di rumore (decorrelazione).

I prodotti di un'analisi interferometrica multi-temporale sono la serie temporale degli spostamenti lungo la linea di vista del sensore (LOS) per ogni punto di misura affidabile, la velocità media di spostamento annuale lungo la stessa direzione, le coordinate geografiche (latitudine e longitudine) e la quota dei punti rispetto a un sistema di riferimento globale (e.g. WGS84). Ogni punto di misura è associato ad un'area della superficie che dipende dalla misura della cella di risoluzione del dato SAR elaborato a piena risoluzione spaziale. Sono disponibili per ciascun punto, inoltre, i coseni direttori della direzione LOS, che sono utili per valutare le componenti di spostamento e velocità media lungo le tre direzioni Est-Ovest, Nord-Sud e Verticale. Infine, per ciascun punto viene fornito solitamente anche un parametro che indica la qualità e/o l'affidabilità dell'informazione di spostamento relativa a tale punto (*coerenza temporale*), il cui valore è compreso tra 0 (massimo rumore) e 1 (assenza di rumore). I punti di misura affidabili sono selezionati sulla base del proprio valore di coerenza temporale, imponendo una soglia minima di tale parametro.

Tutte le misure fornite sono differenziali, ossia ottenute come differenza tra il valore registrato nel punto in esame e quello del *Reference Point*, fissato a priori e generalmente selezionato in un'area assunta stabile, nella quale vengono assunti nulli gli spostamenti. Inoltre, tutte le misure hanno un riferimento temporale corrispondente alla data della prima acquisizione.

La precisione dei risultati forniti delle tecniche interferometriche riguarda essenzialmente tre aspetti distinti: la georeferenziazione dei punti di misura, la determinazione delle velocità medie annuali di spostamento e la determinazione dei valori di spostamento che compongono le serie temporali. Tali precisioni possono variare da tecnica a tecnica. Tipicamente, la precisione delle misure di posizione dei punti di misura è dell'ordine dei metri sia in pianta che in quota, mentre la precisione della velocità media di spostamento è dell'ordine di 1 mm/anno, e quella delle misure di spostamento è dell'ordine dei pochi millimetri (per ulteriori dettagli si rimanda al paragrafo 2.6.4).

2.10 RIFERIMENTI

Berardino P., Fornaro G. Lanari R., Sansosti E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375–2383.

Bing Maps Portal, (2020). <https://www.bingmapsportal.com/> (accessed March 30, 2020)

Bonano M., Manunta M., Marsella M., Lanari R. (2012). Long-term ERS/ENVISAT deformation time-series generation at full spatial resolution via the extended SBAS technique. *International Journal of Remote Sensing*, 33, 4756-4783.

Bonano M., Manunta M., Pepe A., Paglia L., Lanari R. (2013). From previous C-band to new X-band SAR systems: Assessment of the DInSAR mapping improvement for deformation time-series retrieval in urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51, 1973–1984.

- Burgmann R., Rosen P. A., Fielding E. J. (2000). Synthetic Aperture Radar interferometry to measure earth's surface topography and its deformation. *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, 169 - 209.
- Candela G., Demartino C., Marmo F., Monti G. (2020) Geometrical survey of shell and spatial structures using UAV photogrammetry: applicative examples, IWSS2020 1st Italian Workshop on Shell and Spatial Structures, 25th – 26th June 2020 – WEB MEETING
- Casu F., Manzo M., Lanari R. (2006). A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 102(3-4), 195-210.
- CityGML 3.0: New Functions Open Up New Applications. (2020). *PFJ Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88, 43-61.
- Colesanti C., Wasowski J. (2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, 88(3-4), 173-199
- CTR Reg. Lazio, (2002). DTM 5m Regione Lazio. <http://dati.lazio.it/catalog/it/dataset/carta-tecnica-regionale-2002-2003-5k-roma/resource/df8dea52-9982-4429-883d-dafa0e361ab6> (accessed October 21, 2020).
- Dehghani M., Zoej M.J.V., Hooper A., Hanssen R.F., Entezam I., Saatchi S. (2013). Hybrid conventional and Persistent Scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring in the Tehran Basin, Iran, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79, 157–170
- E-Geos - Orthophotos capabilities, (2020). <https://www.e-geos.it/#/hub/hubCapabilities/capability/capability-orthophoto> (accessed October 20, 2020).
- Elachi, C. (1988), *Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques*, IEEE Press, New York
- ESA. (2020). ESA Earth Online. Tratto da Radar Courses: https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ers/instruments/sar/applications/radar-courses/content-3/-/asset_publisher/mQ9R7ZVkJg5P/content/radar-course-3-slant-range-ground-range
- ESA. (2020, Ottobre 21). Copernicus EU-DEM v1.1. Tratto da <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1>
- EU-DEM v1.1 - Copernicus Land Monitoring Service, (n.d.). <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1> (accessed October 21, 2020).
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2202–2212.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20.
- Ferretti A., Fumagalli A., Novati F., Prati C., Rocca F., Rucci A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9), 3460–3470.
- Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C. Rocca F., Massonet D. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*, ESA Publications, TM-19
- Fornaro G., Reale D., Serafino F. (2009). Four-Dimensional SAR Imaging for Height Estimation and Monitoring of Single and Double Scatterers, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1).
- Fornaro G., Lombardini F., Serafino F. (2005). Three-dimensional multipass SAR focusing: experiments with long-term spaceborne data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(4), 702-714.
- Fornaro G., Serafino F. (2006). Imaging of single and double scatterers in urban areas via SAR tomography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(12), 3497-3505.
- Fornaro G., Lombardini F., Pauciuolo A., Reale D., Viviani F. (2014). Tomographic Processing of Interferometric SAR Data: Developments, applications, and future research perspectives, *IEEE Signal Processing Magazine*, 31(4), 41-50.
- Fornaro G., Reale D., Verde S. (2013). Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multidimensional SAR imaging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10, 677–681.
- Fornaro G., Serafino F., Soldovieri F. (2003). Three-dimensional focusing with multipass SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 507–517.

- Franceschetti G., Lanari R. (1999), Synthetic Aperture Radar Processing. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Hooper A., Bekaert D., Spaans K. (2013). StaMPS/MTI Manual Version 3.3b1 School of Earth and Environment University of Leeds, Leeds, United Kingdom
- Hooper A., Segall P., Zebker H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos, *Journal of Geophysical Research*, 112, B07407, doi:10.1029/2006JB004763
- Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B., (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophysical Research Letter*, 31(23), 611–615.
- Lanari R., Reale D., Bonano M., Verde S., Muhammad Y., Fornaro G., Casu F., Manunta M. (2020) Comment on “Pre-Collapse Space Geodetic Observations of Critical Infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy” by Milillo et al. (2019). *Remote Sensing*, 12, 4011. <https://doi.org/10.3390/rs12244011>
- Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorquí J.J., Berardino P., Sansosti E. (2004). A small baseline approach for investigating deformations on full resolution differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, 1377–1386
- Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. (2015). *Remote sensing and Image interpretation*, 7th edition, John Wiley & Sons.
- Manunta M., De Luca C., Zinno I., Casu F., Manzo M., Bonano M., Fusco A., Pepe A., Onorato G., Berardino P., De Martino P., Lanari R. (2019). The Parallel SBAS Approach for Sentinel-1 Interferometric Wide Swath Deformation Time-Series Generation: Algorithm Description and Products Quality Assessment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57, 6259–6281.
- Manunta M., Marsella M., Zeni G., Sciotti M., Atzori S., Lanari R. (2008) Two-scale surface deformation analysis using the SBAS-DInSAR technique: a case study of the city of Rome, Italy, *International Journal of Remote Sensing*, 29(6), 1665-1684. DOI: 10.1080/01431160701395278
- Mazzanti P., Bozzano F., Brunetti A., Esposito C., Martino S., Prestinzi A., Rocca A., Mugnoz G. S. (2015). Terrestrial SAR interferometry monitoring of natural slopes and man-made structures. In: Lollino, G., Manconi, A., Guzzetti, F., Culshaw, M., Bobrowsky, P.T., Luino, F. (eds). *Engineering Geology for Society and Territory*. Volume 5, 189-194. Springer International Publishing Switzerland. ISBN 978-3-319-09047-4.
- McGlone J.C. (2017) Photogrammetric Products. In: Shekhar S., Xiong H., Zhou X. (eds) *Encyclopedia of GIS*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17885-1_982
- Mohammed O. I., Saeidi V., Pradhan B., Yusuf, Y. A. (2014). Advanced differential interferometry synthetic aperture radar techniques for deformation monitoring: A review on sensors and recent research development. *Geocarto International*, 29(5), 536-553.
- NASA-JPL. Jet Propulsion Laboratory, ASTER - GDEM, (n.d.). <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> (accessed October 21, 2020).
- Olmsted C. (1993). *Scientific SAR User's Guide*. Alaska SAR Facility.
- Reale D., Fornaro G., Pauciuolo A. (2013). Extension of 4-D SAR Imaging to the Monitoring of Thermally Dilating Scatterers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51, 5296–5306.
- Regione Liguria website, 2020. Nota sintetica per la comprensione del dato satellitare PSInSAR™ e SqueeSAR™, http://www.cartografiarl.regione.liguria.it/RiskNat/doc/NOTA%20SINTETICA_PSInSAR.pdf
- Rosen P. A., Hensley S., Joughin I. R., Li F. K., Madsen S. N., Rodriguez E., Goldstein R. M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proc. IEEE*, 88(3), 333–382.
- TanDEM-X Science service system, Zent. Dtsch. Cent. Für Luft- Und Raumfahrt - Ger. Aerosp. Cent. (n.d.). <https://tandemx-science.dlr.de/> (accessed October 21, 2020).
- Thenkabail P.S. editor. (2015). *Remotely sensed data characterization, classification, and accuracies*. CRC Press. doi:10.1201/b19294. ISBN 9781482217865
- TRE Sensing the Planet, PSInSAR™ - Manuale d'uso, Luglio 2008
- TRE website (2020), <https://site.tre-altamira.com/insar/> (accessed October 30, 2020)
- USGS, Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global, (n.d.). doi:10.5066/F7PR7TFT.

Velotto D. (2016). Oil spill and ship detection using high resolution polarimetric X-band SAR data. Munchen, DE: TUM.

Wikipedia website (2020), https://en.wikipedia.org/wiki/Interferometric_synthetic-aperture_radar/ (accessed October 30, 2020)

WMS-Geoportale. Servizio WMS - Geoportale Nazionale, (n.d.). Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. <http://www.pcn.minambiente.it/mattm/servizio-wms/> (accessed October 20, 2020).

BOZZA

3 ELABORAZIONE DEI RISULTATI DELL'INTERFEROMETRIA SATELLITARE NEL CAMPO DELLE COSTRUZIONI ESISTENTI

3.1 PREMESSA

I dati interferometrici, come riportato nel capitolo precedente, sono generalmente rappresentati in termini di punti che hanno una risposta particolarmente coerente durante il periodo di osservazione (i.e. punti di misura, ovvero *Persistent Scatterers* - PSs, si veda paragrafo 2.5). Tipicamente i punti di misura sono rappresentati da parti di edifici, da strutture metalliche, e in generale da elementi artificiali o naturali la cui risposta elettromagnetica non vari significativamente tra acquisizione ed acquisizione (si vedano anche paragrafi 2.2 e 2.6). Il numero di punti di misura in zone urbane varia a seconda del sensore utilizzato con densità dell'ordine di 100-400 punti/km² in caso di utilizzo di sensori in banda C (ERS/ENVISAT), fino ad arrivare a 8000 punti/km² in caso di utilizzo di sensori in banda X (COSMO-SkyMed), si veda anche paragrafo 2.6.3. Per ogni singolo punto di misura vengono fornite la posizione, il trend medio di spostamento e l'intera serie temporale di spostamento come spiegato in dettaglio nel capitolo precedente.

Quanto presentato consente quindi di sviluppare valutazioni su singoli punti. Più complesso è certamente il tema dell'analisi e della conseguente valutazione dello stato attuale di opere di ingegneria civile come infrastrutture ed edifici, le quali hanno una geometria assai variabile e, soprattutto per la loro consistenza e natura strutturale, pongono problematiche di congruenza tra i cinematici delle varie parti non agevolmente separabili dalla tipologia costruttiva e dai materiali impiegati.

A questo scopo l'integrazione delle informazioni di più punti di misura consente di avere una visione di insieme che riduce le incertezze delle singole letture. Questo concetto viene approfondito nel presente capitolo che tratta il tema dell'utilizzo e dell'elaborazione dei risultati dei dati interferometrici, illustrando tecniche per la creazione di mappe di velocità e/o di spostamento continue particolarmente utili per valutazioni a livello strutturale e geotecnico.

In particolare, vengono discusse le informazioni che possono essere desunte dall'analisi di un singolo dataset (ascendente o discendente), paragrafo 3.2, e successivamente viene analizzato il problema della combinazione delle misure provenienti da entrambi i dataset, paragrafo 3.3. Questo al fine di associare a ciascun tipo di analisi il corrispondente livello di informazione desumibile anche in relazione all'obiettivo delle analisi stesse (per ampie zone, mappe di velocità lungo la LOS che possono segnalare fenomeni in atto, etc.).

La necessità di operare ricampionamenti spaziali e/o temporali viene affrontata in termini generali all'interno del paragrafo 3.3. Nel successivo paragrafo 3.4 viene approfondito il tema del ricampionamento spaziale mediante interpolazione, descrivendo le principali tecniche ed i loro possibili utilizzi con un solo dataset (ad es. per coprire eventuali zone d'ombra, se pur in questo caso sia necessario porre attenzione al risultato che si ottiene, soprattutto per zone d'ombra di ampiezza significativa, potendo tale risultato non essere ben correlato con il fenomeno reale eventualmente in atto), ovvero con entrambi i dataset. In questo secondo caso si ha infatti la possibilità di combinare i valori di velocità o spostamento in tutti i punti della griglia di interpolazione. A tal proposito si ricorda che, come premesso nel paragrafo 2.5, i punti di misura dei due dataset difficilmente coincidono e spesso non sono neppure vicini tra loro. Di conseguenza, in molti casi la possibilità di utilizzare i dati provenienti da entrambi i dataset richiede un'operazione preliminare, quale l'interpolazione o la tecnica del sotto-campionamento, al fine di poter disporre delle due informazioni in uno stesso punto. Vengono infine riportate alcune considerazioni sui possibili vantaggi e svantaggi dell'utilizzo di tecniche di interpolazione deterministiche e stocastiche.

È importante sottolineare come la tecnica di elaborazione da utilizzare e la tipologia di informazione ottenibile possa essere sostanzialmente differente in funzione della tipologia di struttura (edificio, ponte, edificio alto, etc.) e del suo orientamento spaziale (es. un ponte orientato N-S o E-W si possono ottenere informazioni sui fenomeni deformativi significativamente differenti), per dettagli fare riferimento ai capitoli specifici.

Nell'ultima sezione del capitolo si discutono alcuni aspetti sulla possibilità di eseguire interpolazioni 3D. Nel paragrafo 3.7, infine vengono esaminate criticamente le prestazioni delle varie metodologie presentate ed

esaminati i limiti e le criticità delle quali si deve tener conto per un'applicazione consapevole e razionale dei dati satellitari di natura interferometrica in relazione allo specifico problema e alla sua natura, geotecnica o strutturale.

3.2 UTILIZZO DEI DATI DI UN SINGOLO DATASET

In generale, l'analisi dei dati ottenuti dall'elaborazione di una singola orbita (dataset ascendente o discendente) può fornire informazioni preliminari in relazione a fenomeni deformativi in atto, sebbene sia ben noto che, a partire dalle misure di deformazione di un singolo dataset, non è possibile trarre considerazioni definitive. Infatti, le informazioni di un singolo dataset forniscono le componenti di spostamento e di velocità media di spostamento lungo una sola direzione (la LOS, ovvero la direzione congiungente il sensore con il bersaglio a terra).

La percentuale di spostamento reale rilevabile dal dato satellitare dipende dalla direzione dello spostamento reale stesso e dall'angolo di incidenza della linea di vista con la superficie terrestre.

Quest'ultima, come riportato al paragrafo 2.2, è definita dall'angolo di inclinazione dell'orbita Φ (heading angle) e dall'angolo θ (off-nadir o look-angle), come riportato in Figura 3.1 e Figura 3.2.

Interessante sottolineare che, anche considerando lo stesso satellite e la stessa modalità di acquisizione, i valori di questi angoli possano assumere valori leggermente differenti tra i diversi pixel di una stessa area. Di conseguenza le informazioni sulla LOS sono fornite per ogni PS appartenente al singolo dataset.

In termini di misura di deformazione generalizzata δ , che può rappresentare sia uno spostamento, sia la velocità media di spostamento, il valore misurato lungo le LOS Ascendente e Discendente (LOS,A/D) può essere espresso in termini di componenti lungo le direzioni E-W, N-S e verticale (rispettivamente E, N e U):

$$\begin{aligned}\delta_{LOS,A} &= \delta_E \cdot c_{E,A} + \delta_N \cdot c_{N,A} + \delta_U \cdot c_{U,A} \\ \delta_{LOS,D} &= \delta_E \cdot c_{E,D} + \delta_N \cdot c_{N,D} + \delta_U \cdot c_{U,D}\end{aligned}\quad (9)$$

dove $(c_{E,A/D}, c_{N,A/D}, c_{U,A/D})$ sono i coseni direttori degli angoli $\alpha_{E,A/D}, \alpha_{N,A/D}, \alpha_{U,A/D}$, tra le direzioni E-W, N-S e verticale e le LOS,A/D rispettivamente, come mostrato in Figura 3.1. Essi rappresentano le componenti dei versori delle direzioni delle LOS ascendente e discendente, rispettivamente indicati dai simboli: $i_{LOS,A}$ e $i_{LOS,D}$, ed espressi in funzione della direzione della LOS secondo le ben note relazioni:

$$c_{E,A/D} = \cos \Phi_{A/D} \cdot \sin \theta_{A/D} \quad c_{N,A/D} = \sin \Phi_{A/D} \cdot \sin \theta_{A/D} \quad c_U = \cos \theta_{A/D} \quad (10)$$

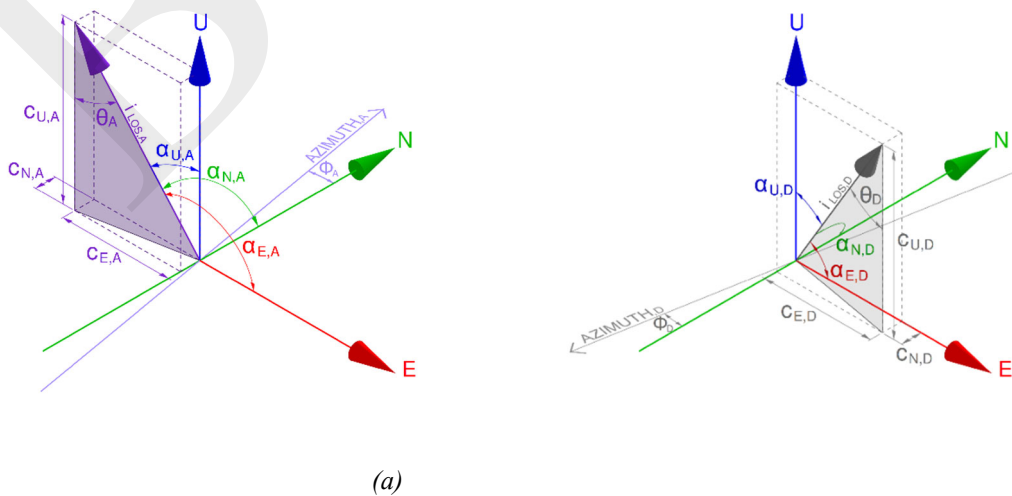


Figura 3.1 – Geometria di acquisizione del satellite: (a) orbita ascendente – ASC; (b) orbita discendente – DES.

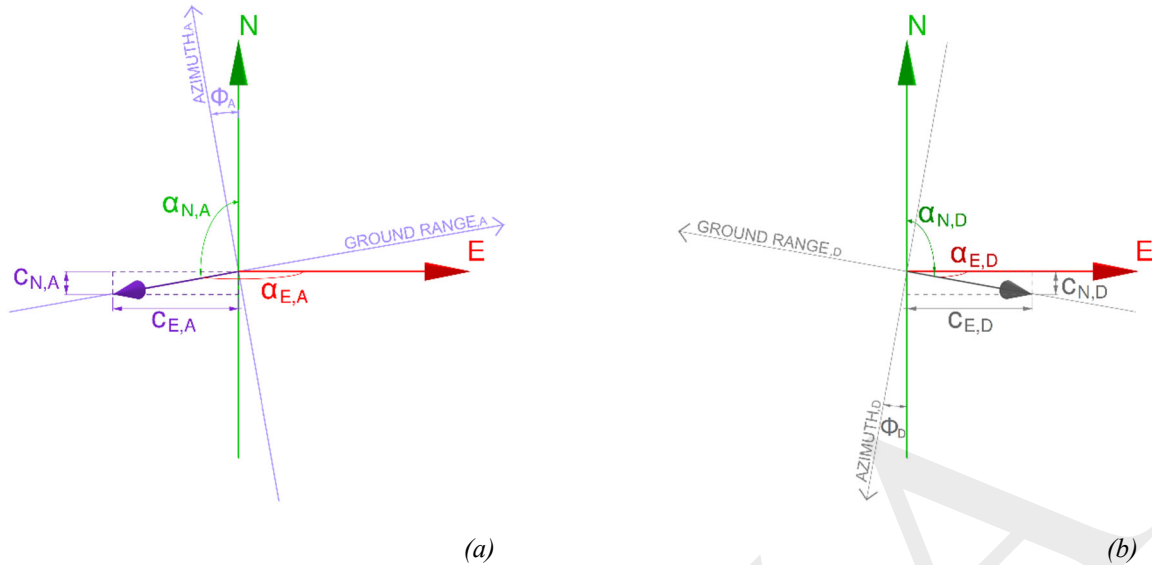


Figura 3.2 – Vista dall'alto della geometria di acquisizione del satellite: (a) orbita ascendente – ASC; (b) orbita discendente – DES.

Dall'equazione (9) si osserva come la quota di spostamento (ovvero di velocità media di spostamento) rilevabile lungo la LOS dipende dai valori dei coseni direttori. A titolo di esempio la Tabella 3.1 riporta i valori dei coseni per le direzioni LOS e, quindi, la percentuale di deformazione rilevabile dal satellite (analisi di sensibilità della tecnica) rispetto alle direzioni N-S, E-W e alla verticale dei satelliti ERS1/2 e ENVISAT-ASAR, del satellite RADARSAT-1-2 e del satellite COSMO-SkyMed in modalità Stripmap (Sansosti et al., 2014).

Tale analisi mette in luce come gli spostamenti in direzione verticale siano rilevati quasi integralmente nelle diverse geometrie di acquisizione analizzate, gli spostamenti orizzontali in direzione E-W solo parzialmente mentre in direzione N-S sono praticamente non rilevati con entrambe le linee di vista. Una conseguenza è che usualmente nelle rappresentazioni ci si può riferire con buona approssimazione ad un piano verticale – Est, rispetto al reale piano contenente la verticale e la LOS. Questa assunzione è spesso utilizzata nelle analisi eseguite utilizzando i dati DInSAR.

Tabella 3.1. Valutazione della sensibilità degli strumenti nelle diverse direzioni

Satellite	ERS1/2	ENVISAT-ASAR	RADARSAT-1/2	COSMO-SkyMed
Modalità di acquisizione	Stripmap	Stripmap	Stripmap	Stripmap
Φ [°]*	8.5	8.5	8.6	7.86
θ [°]**	23	15 - 45	20-50	20-60
c_E [%]	38.6	25.6 – 69.9	33.8 – 75.7	33.9 – 85.8
c_N [%]	5.8	3.8 – 10.5	5.11 – 11.4	4.7 – 11.8
c_U [%]	92.1	96.6 – 70.7	93.9 – 64.3	93.9 – 50

* dal portale ESA EO (<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/>)

** da Sansosti et al., 2014

In sintesi, quanto più la direzione del vettore di spostamento reale, ovvero di velocità media di spostamento reale, si discosta dalla direzione della linea di vista, tanto minore è la componente rilevata dal satellite (cfr. Figura 3.3, per il caso di velocità media di spostamento). Come condizione limite, nel caso in cui la direzione dello spostamento (o della velocità media) reale sia perpendicolare alla LOS, la componente misurata dal sensore risulta essere nulla (Figura 3.3c). Per tale motivo, è importante notare come una indicazione di elevato

spostamento lungo la LOS sia certamente segnale di un processo deformativo in atto; viceversa, una indicazione di basso spostamento lungo la LOS non è garanzia della assenza di fenomeni deformativi in atto. Per convenzione, alle misure di spostamento o di velocità in avvicinamento o in allontanamento dal satellite si assegnano rispettivamente segno positivo e negativo.

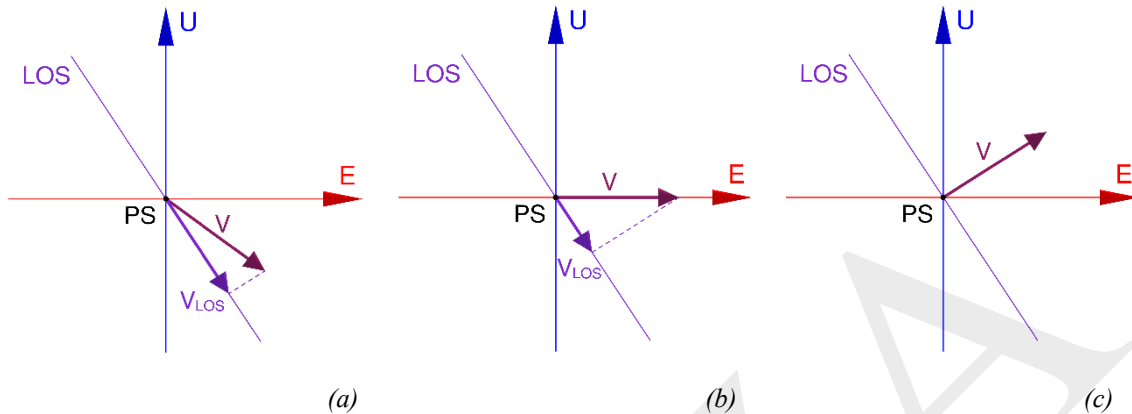


Figura 3.3 – Variabilità della componente di velocità media misurata in funzione della direzione della velocità media reale: (a)-(b) Velocità reale con componente parallela alla LOS; (c) Velocità reale ortogonale alla LOS

È interessante inoltre notare come l'utilizzo di un singolo dataset possa fornire indicazioni significative al fine di determinare il vettore di spostamento reale, quando usato in associazione a dati derivanti da studi preesistenti o da tecniche di monitoraggio tradizionale applicate in sito, come ad esempio livellazione ottica o misure GPS. In particolare, se è nota la direzione di deformazione del fenomeno in esame è possibile ricavare l'intensità dello spostamento lungo tale direzione, a partire dalla proiezione misurata lungo la LOS del satellite. Nello studio di alcune tipologie di fenomeni di dissesto si può ipotizzare che la principale componente di spostamento assuma particolari direzioni; ad esempio, nel caso di fenomeni di scivolamento del terreno si può ipotizzare che la direzione dello spostamento reale coincida con la direzione di massima pendenza del versante, oppure nel caso di fenomeni di subsidenza si può ipotizzare che la direzione principale di spostamento sia verticale. Assunzioni di questo tipo devono comunque essere adottate con molta cautela, non sono operazioni generalizzabili e devono essere valutate caso per caso.

Infine, va sottolineato come la distribuzione spaziale dei punti di misura, come già spiegato in precedenza, non sia omogenea spazialmente. Per tale motivo, al fine di facilitare l'interpretazione dei fenomeni deformativi in atto ed estendere le informazioni sugli spostamenti anche su aree prive di bersagli radar, le misure puntuali di spostamento sui bersagli radar possono essere interpolate mediante appositi algoritmi di interpolazione spaziale, implementati in ambiente GIS, di tipo deterministico (quali ad esempio *Triangulated Irregular Network* – TIN, *Inverse Distance Weighted* – IDW, ecc.) o di tipo geostatistico (quale ad esempio le tecniche di tipo *Kriging*). Mentre i metodi di tipo deterministico non sono in grado di cogliere la struttura spaziale dei dati, i metodi di tipo geostatistico si basano sul *fitting* di modelli spaziali ai dati. Una descrizione più puntuale dei metodi di interpolazione spaziale è riportata nel paragrafo 3.4.

È tuttavia molto importante tenere in considerazione che tali operazioni di interpolazione possono essere effettuate solo in aree in cui la densità e la distribuzione dei punti di misura siano tali da poter essere considerati rappresentativi dell'area stessa e la tipologia del fenomeno deformativo analizzato sia caratterizzata da una distribuzione spaziale degli spostamenti correlata nello spazio. Questo significa che particolare attenzione va posta nella definizione dell'area da utilizzare per la procedura di interpolazione, soprattutto quando movimenti di porzioni diverse del sito esaminato possono non essere effettivamente correlate tra loro. Un esempio tipico di questa situazione è il caso della deformazione di un impalcato da ponte, che potrebbe non essere correlata al processo deformativo del terreno circostante.

Un'altra questione nella scelta dell'area da considerare è legata all'effetto *shadowing*, per cui spesso i punti di misura nelle immediate vicinanze dell'edificio si hanno soltanto dal lato esposto alla vista del satellite. Questo

aspetto è evidenziato in Figura 3.4, dove è riportata la distribuzione dei punti dei dataset ascendente e discendente nell'area del complesso del San Michele a Ripa Grande a Roma. Di conseguenza, quando si vogliono interpolare le misure di spostamento di una zona attorno ad uno specifico edificio è fondamentale selezionare un'area sufficientemente vasta per avere una quantità di punti tale da consentire l'utilizzo di tale tecnica evitando di dover fare estrapolazioni.

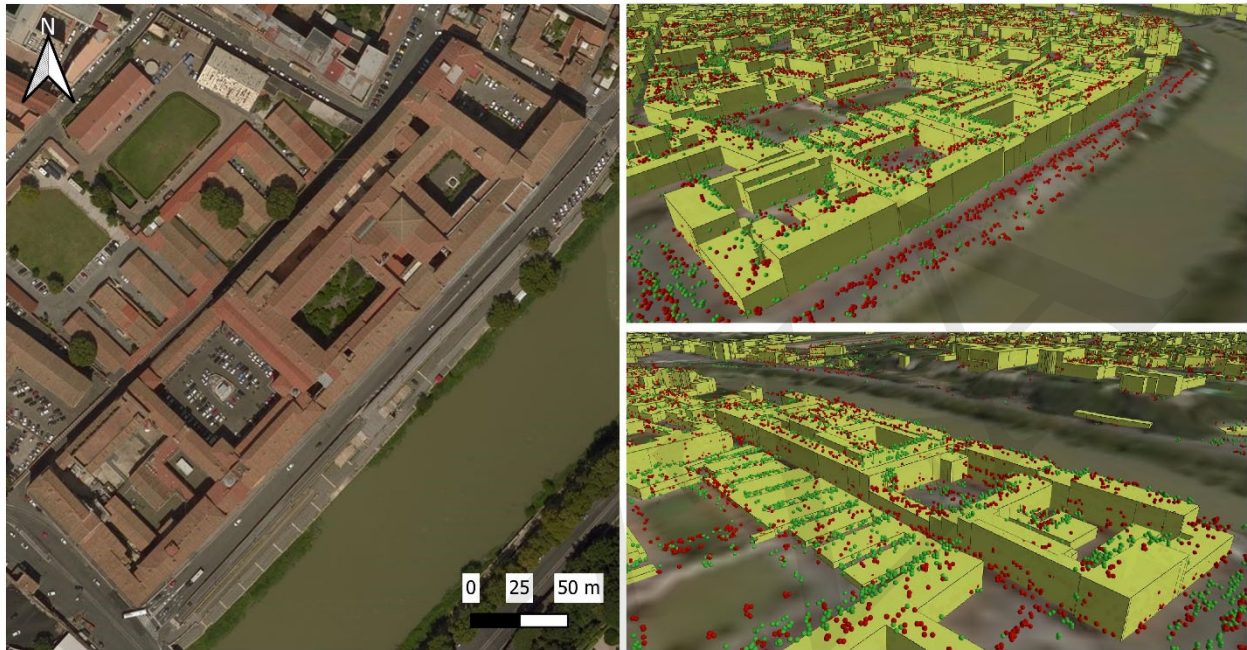


Figura 3.4 – Distribuzione dei punti di misura del dataset ascendente (rosso) e discendente (verde) per il complesso del San Michele a Ripa Grande in Roma

Un ulteriore esempio è presentato in Figura 3.5 che mostra la distribuzione dei punti dei dataset ascendente e discendente nell'area del complesso del Corviale a Roma. In questo caso, oltre al problema legato all'effetto *shadowing*, si può osservare come il numero dei punti di misura nell'area attorno all'edificio sia molto limitato. Questo fatto rende l'utilizzo delle tecniche di interpolazione un tema critico: vanno adottate particolari cautele, poiché i risultati che si ottengono nelle aree inizialmente prive di punti di misura, ed ottenuti mediante estrapolazioni di fatto (e non interpolazioni), possono rappresentare dati meno affidabili degli altri.



Figura 3.5 – Distribuzione dei punti di misura del dataset ascendente (rosso) e discendente (verde) per l'edificio del Corviale in Roma

3.3 UTILIZZO DEI DATI DEI DUE DATASET ASCENDENTE E DISCENDENTE

Nel caso in cui, nell'area in esame, siano disponibili i risultati delle elaborazioni interferometriche effettuate in entrambe le geometrie ascendente e discendente, si ha un aumento della quantità e della qualità delle informazioni desumibili sui fenomeni deformativi in atto.

Già solo l'osservazione della distribuzione delle deformazioni generalizzate lungo le LOS, ad esempio in termini di velocità medie di spostamento, ottenute in orbita ascendente ($V_{LOS,A}$) e discendente ($V_{LOS,D}$), permette di analizzare il fenomeno deformativo in atto. Considerando ad esempio il caso di velocità (V) reale verticale (in direzione U) riportata schematicamente in Figura 3.6a, si può osservare come il segno della misura di spostamento rilevata dal satellite sia concorde in entrambe le geometrie di acquisizione: nel caso di abbassamento in entrambe le geometrie si leggeranno valori negativi (allontanamento dal satellite), mentre nel caso di sollevamento in entrambe le geometrie si leggeranno valori positivi (avvicinamento al satellite). Inoltre, nel caso in cui l'angolo di incidenza sia uguale per entrambe le geometrie ascendente e discendente, il modulo del vettore di velocità lungo la LOS sarà uguale in entrambi i casi. Considerando invece il caso di velocità (V) reale orizzontale (in direzione E-W), riportato schematicamente in Figura 3.6b, si può osservare come le misure delle due geometrie abbiano segno discorde e, nel caso di uguale angolo di incidenza, uguale modulo. Questo è dovuto al fatto che in una geometria il satellite rilevi un avvicinamento mentre nell'altra geometria il satellite rilevi un allontanamento.

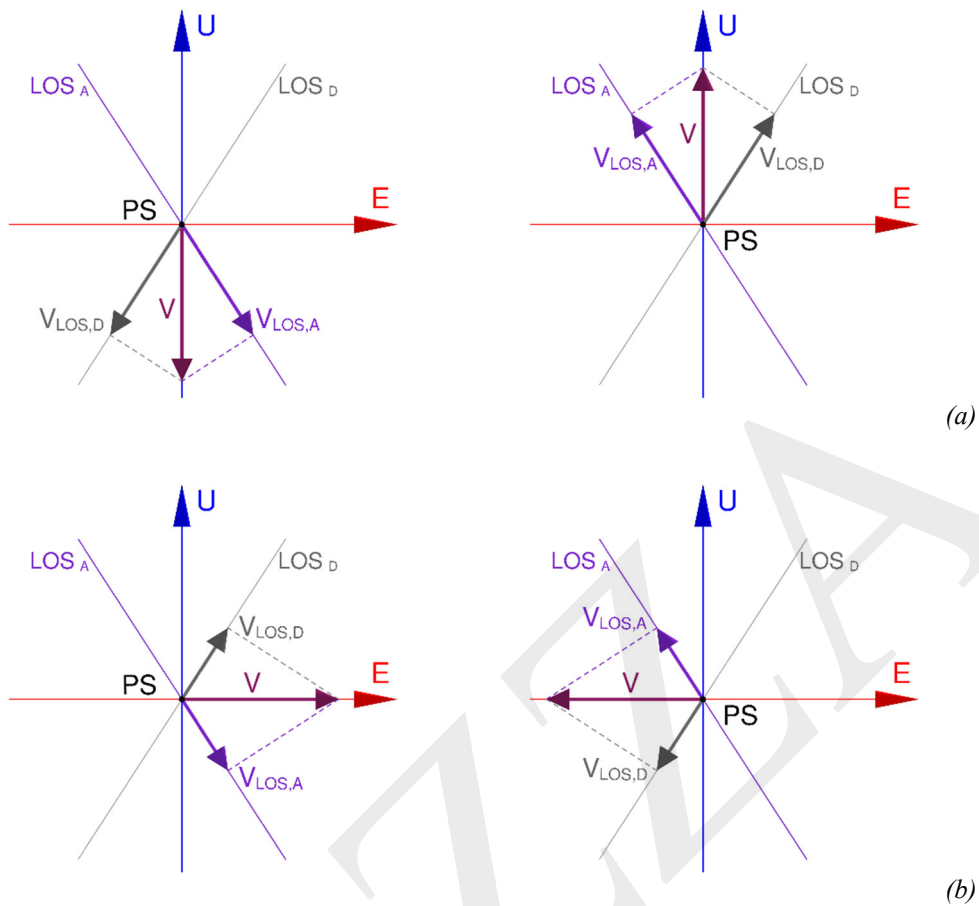


Figura 3.6 - Esempio di scomposizione del vettore di velocità media di spostamento reale in geometria ascendente e discendente. a) Velocità verticale b) Velocità orizzontale

Un primo confronto quindi dei valori di velocità di spostamento nelle due geometrie consente di individuare a prima vista se il fenomeno investigato sia caratterizzato da componenti del moto anche in direzione orizzontale (caso di valori di velocità $V_{LOS,A}$ e $V_{LOS,D}$ con segno opposto). Per questa ragione è consigliabile, quando si rappresentano mappe di velocità in termini di dati sia ascendenti che discendenti, utilizzare una simbologia diversa per i due dataset così da non confondere i due tipi di informazione, come riportato in Figura 3.7, laddove con un rombo sono riportati i dati di velocità discendenti e con un tondo quelli ascendenti.

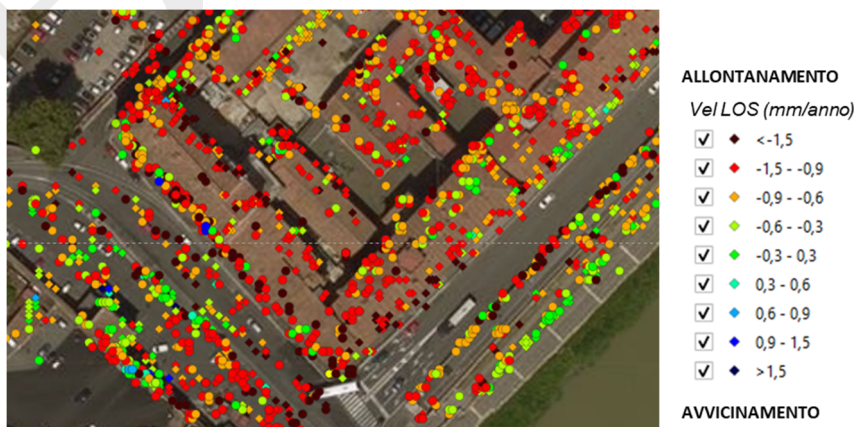


Figura 3.7 - Esempio del complesso del San Michele a Roma. Il simbolo a rombo si riferisce al dataset discendente, il simbolo circolare si riferisce al dataset ascendente

È interessante notare inoltre come sia possibile combinare i due dataset al fine di poter stimare la direzione del vettore di spostamento nel piano Est-Verticale (non potendo risalire invece a componenti di spostamento in direzione N-S per ragioni intrinseche del sistema). Infatti, da un punto di vista ingegneristico sarebbe molto interessante poter studiare il profilo delle componenti verticale ed orizzontale del vettore velocità, per poter predire un eventuale danno legato ad esse o correlare un danno sopravvenuto ad uno spostamento che, come si potrebbe leggere, sia stato prevalentemente diretto lungo una delle due direzioni.

Il problema della composizione di spostamenti e di velocità medie di spostamento dei due dataset viene risolto da un punto di vista geometrico.

Si consideri uno stesso target a cui sono associate le corrispondenti deformazioni generalizzate (spostamenti o velocità media) $\delta_{LOS,A}$ e $\delta_{LOS,D}$ rilevate dal satellite in orbita ascendente e discendente, rispettivamente (Figura 3.8). Da sottolineare come tale condizione si verifichi nella realtà molto raramente, ad esempio quando si tratti di un punto riflettente artificiale (es. *corner reflector*), o nei casi in cui si tratti di un punto visibile allo stesso modo da entrambe le orbite. In generale per poter disporre dei valori di velocità per entrambe le orbite in uno stesso punto è necessario utilizzare tecniche di ricampionamento spaziale (es. tecniche di interpolazione, di sottocampionamento, di *clustering*, etc.).

Volendo determinare le componenti del vettore di deformazione generalizzata nelle tre direzioni E, N e verticale, noti i vettori in direzione LOS,A e LOS,D ($\delta_{LOS,A}$ e $\delta_{LOS,D}$), le incognite del sistema formato dalle due equazioni della (9) sono tre (δ_E , δ_N e δ_U) e quindi il sistema risulta non risolvibile.

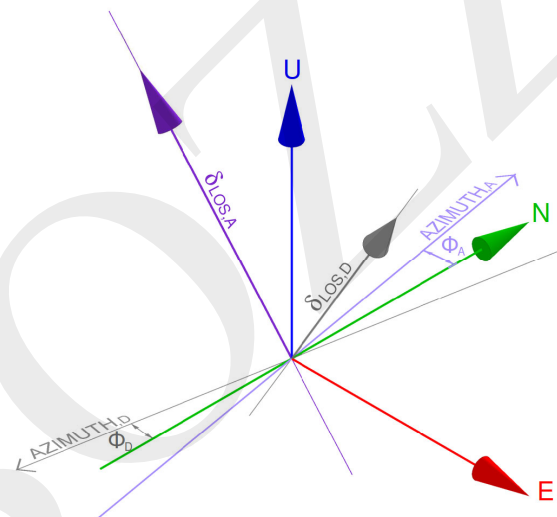


Figura 3.8 – Schematizzazione delle geometrie di acquisizione e delle direzioni lungo cui scomporre il vettore velocità

Come anticipato al paragrafo 3.2, a causa dell'inclinazione dell'orbita rispetto ai meridiani terrestri e della modalità di acquisizione del segnale caratterizzata dalla vista del satellite laterale ed inclinata, si ha che il sensore durante una data acquisizione risulta molto poco sensibile alla misura della componente del moto nella direzione orizzontale N-S. Pertanto, la deformazione generalizzata in direzione N-S può essere trascurata (assumendo $\delta_N = 0$) commettendo un errore limitato e consentendo di risolvere il precedente sistema, ottenendo quindi una stima attendibile delle componenti del moto δ_E , in direzione E, e δ_U in direzione verticale.

Noti i coseni direttori del satellite al momento dell'acquisizione nelle due rispettive geometrie e ipotizzando che lo spostamento in direzione N-S sia nullo, è possibile dunque calcolare le componenti verticale ed orizzontale in direzione E-W, del vettore di deformazione generalizzata reale attraverso il seguente sistema:

$$\begin{cases} \delta_{LOS,A} \cong \delta_E \cdot c_{E,A} + \delta_U \cdot c_{U,A} \\ \delta_{LOS,D} \cong \delta_E \cdot c_{E,D} + \delta_U \cdot c_{U,D} \end{cases} \quad (11)$$

in cui δ_U e δ_E sono le incognite da ricavare.

È importante ricordare che la condizione per cui le due geometrie di acquisizione identifichino esattamente lo stesso punto di misura non è praticamente mai verificata. Per tale motivo, nella maggioranza dei casi, per poter effettuare la composizione del moto descritta precedentemente è necessario procedere a un ricampionamento spaziale ed eventualmente temporale dei dati ottenuti nelle due geometrie di acquisizione.

3.3.1 Ricampionamento temporale

Il ricampionamento temporale è necessario nel caso si vogliano studiare processi deformativi in atto in termini di spostamento in un preciso istante temporale. Esso permette inoltre di ottenere un comune inizio delle misure per i dataset ascendente e discendente, oltre che dati ad intervalli di tempo costanti. Il ricampionamento temporale può essere effettuato in post-processing attraverso diverse tecniche numeriche, come interpolazioni polinomiali (tipicamente lineari o cubiche) oppure tramite interpolazioni *spline*. Queste ultime approssimano la serie temporale degli spostamenti dividendo la finestra in più sotto-intervalli e adottando per ciascuno di essi funzioni polinomiali di grado basso, raccordando i vari tratti attraverso l'imposizione di vincoli sulle derivate delle estremità di ogni sotto-intervallo.

Per segnali aventi tempo di campionamento non uniforme è doveroso considerare che il teorema di Nyquist afferma che un segnale (teoreticamente per segnali a banda limitata), può essere ricostruito in maniera fedele a partire dal tempo di campionamento medio, e la frequenza di campionamento associata deve essere superiore al doppio della banda utile.

Nel caso in cui si vogliano stimare valori di spostamento in finestre per le quali vi sono ampie mancanze di dati, è possibile utilizzare tecniche di analisi del segnale e modelli analitici quali modelli autoregressivi. A titolo di esempio, i modelli ARX (modelli autoregressivi con ingresso esogeno) sono capaci di predire il valore più probabile di spostamento tenendo in conto della presenza di effetti esterni che ne influenzano l'andamento, quali la temperatura o il livello di falda nel terreno. In Figura 3.9 è riportato un esempio di ricampionamento temporale. In Figura 3.9a si riportano le serie temporali dei due punti di misura, che sono sufficientemente vicini per essere combinati. In Figura 3.9b si osserva il ricampionamento della serie temporale del punto di misura in geometria ascendente rispetto agli istanti di acquisizione del punto in geometria discendente. Le serie ricampionate vengono sovrapposte a quelle originali, raffigurate con colori più chiari. In questo modo si ottiene che le due serie temporali sono riferite agli stessi istanti temporali, in modo da poter successivamente procedere alla combinazione degli spostamenti, ovvero al calcolo delle componenti di spostamento E-W e Verticale per ciascun istante temporale. Nella serie temporale ascendente, il primo periodo è stato tagliato in modo da avere lo stesso punto di partenza per entrambe le serie temporali di spostamento. Nel caso di taglio della parte iniziale dei dati, è necessario sottrarre alla serie temporale rimanente lo spostamento misurato al momento del taglio, si veda Figura 3.9c. Se lo studio dei processi deformativi in atto è effettuato in termini di velocità di spostamento media, il ricampionamento temporale può essere in molti casi evitato (nello specifico quando l'istante di inizio delle misurazioni nelle due geometrie non sia troppo diverso), osservando come la velocità media di spostamento sia poco influenzata da pochi punti di misura in una serie temporale lunga e coerente nel tempo.

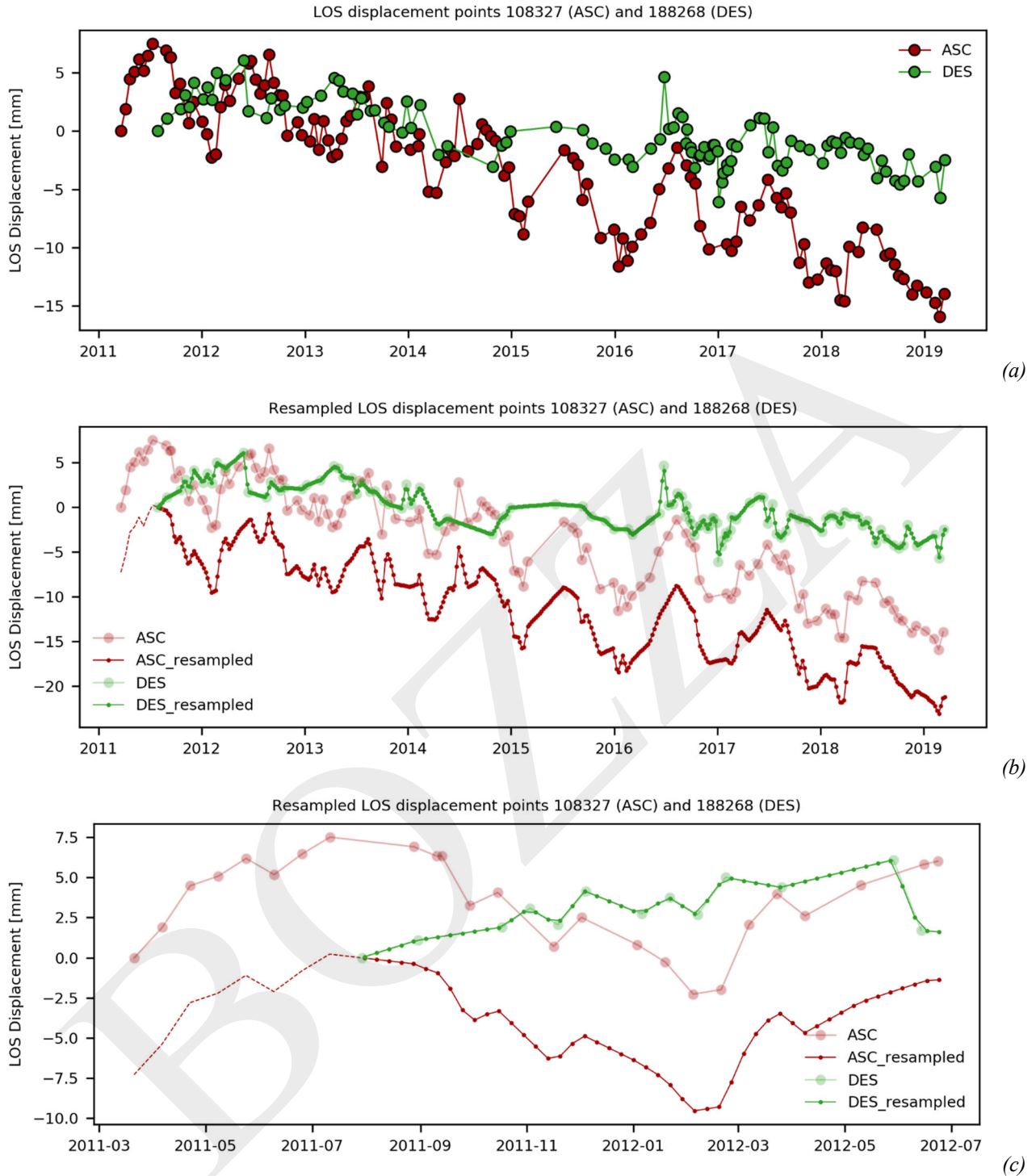


Figura 3.9 – Esempio di ricampionamento temporale per due punti sufficientemente vicini nei dataset ascendente e discendente: (a) serie temporali originali degli spostamenti; (b) serie temporali ricampionate con una frequenza di campionamento di 1 settimana; (c) ingrandimento della zona iniziale delle serie temporali di spostamento ricampionate; (Complesso del San Michele a Roma)

3.3.2 Ricampionamento spaziale

Le tecniche di ricampionamento spaziale possono essere impiegate per ottenere un insieme di punti referenziati spazialmente, cui sono associate le informazioni sugli spostamenti lungo la LOS per entrambe le geometrie di acquisizione, al fine di eseguire combinazioni successive. Le fasi di ricampionamento e combinazione possono essere eseguite sia in spazio raster, ad esempio con metodi di interpolazione (come indicato per il singolo

dataset nel paragrafo 3.2 e descritto in dettaglio nel paragrafo 3.4) o tecniche di sotto-campionamento su griglia regolare (*grid-subsampling*) e.g. TRE (2020), sia in spazio vettoriale, ad esempio con approcci dove si combinano i punti più vicini (*nearest neighbors*) ovvero con tecniche di *clustering* (e.g. Zhu et al. 2018), dove i punti vengono raggruppati secondo classi omogenee. Queste classi possono contenere punti rappresentativi di uno stesso elemento strutturale ovvero caratterizzati da un comportamento omogeneo per spostamento. La categorizzazione può essere eseguita o manualmente o secondo algoritmi di Machine Learning.

Lavorare con tecniche di interpolazione ha il vantaggio di fornire mappe continue, sebbene sia più difficile dar conto della natura tridimensionale dei dati DInSAR e sia più complesso combinare le serie di spostamento. Nelle tecniche di sotto-campionamento su griglia regolare l'area di interesse viene suddivisa in celle di ricampionamento quadrate di dimensione scelta arbitrariamente; ad ogni cella (che rappresenta un punto di misura sintetico) viene assegnata una velocità di spostamento pari alla media dei valori di velocità dei punti di misura che ricadono nella cella (come riportato schematicamente in Figura 3.10).

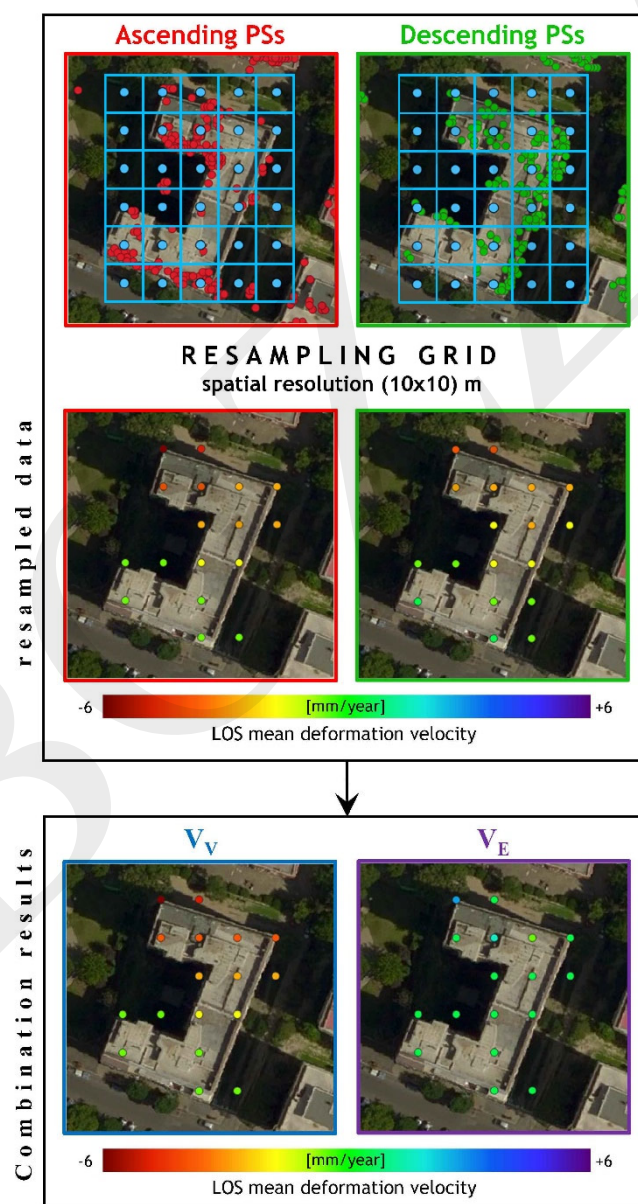


Figura 3.10 – Rappresentazione schematica di composizione dei dataset ascendenti e discendenti mediante sotto-campionamento in griglie regolari.

Le operazioni di interpolazione spaziale introducono alcune incertezze dovute alle fasi di rasterizzazione dei dati, in particolare a causa di mancanza di dati in zone di *shadowing* o *layover* (come spesso accade in zone urbane dove la geometria stessa degli edifici può oscurare parte di essi alla vista del satellite) o zone di decorrelazione (come zone significativamente vegetate).

Un approccio alternativo riguarda la possibilità di combinare direttamente i moti nelle due geometrie di acquisizione usando le grandezze vettoriali con un approccio basato sui più vicini vettori (*nearest neighbor vector approach*) prima di ogni operazione di rasterizzazione (Foumelis 2016). Gli approcci *nearest neighbors* combinano punti appartenenti ai dataset ascendente e discendente, sufficientemente vicini tra loro, nello spazio vettoriale senza alcun processo di rasterizzazione, evitando le incertezze associate. La distanza tra i punti da poter considerare come coppia da poter combinare è un valore da definire. Lavorare nello spazio vettoriale consente di tenere facilmente conto della posizione effettiva dei punti nello spazio e di combinare le storie di spostamento ai fini del calcolo delle componenti dello spostamento verticale e orizzontale E-W.

3.4 TECNICHE DI INTERPOLAZIONE SPAZIALE

Prima di procedere con la presentazione delle varie tecniche di interpolazione spaziale, è necessario sottolineare l'importanza di uno studio attento della struttura dei dati a disposizione. In particolare, sarebbe opportuno perseguire un'analisi preliminare delle possibili correlazioni spaziali tra gruppi di punti, in modo da evitare una significativa influenza delle suddette correlazioni locali sui risultati delle operazioni.

Un'interpolazione spaziale di dati SAR che ricadono in una certa area ha come obiettivo l'assegnazione di un valore anche a punti non campionati. Mediamente i punti vicini hanno valori simili tra loro, al di là di qualche possibile eccezione che possa causare una discontinuità di valori, e una buona interpolazione deve poter cogliere tali corrispondenze.

Le mappe continue che si ottengono a seguito dell'applicazione di tecniche di interpolazione dei dati risultano di più immediata e semplice lettura rispetto ai singoli dati SAR, soprattutto nel caso debbano essere utilizzate da professionisti meno esperti nelle tecniche di monitoraggio mediante dati satellitari.

Con riferimento ad un edificio, l'interpolazione spaziale dei punti può essere eseguita a quota terreno e, in certi casi, anche a diverse quote, ad esempio al livello della copertura. Il confronto tra le mappe delle componenti di velocità a diverse quote può essere utile al fine di riconoscere eventuali differenziali di spostamento variabili con l'altezza, soprattutto in termini di *drift* orizzontale. È da sottolineare, però, come l'esecuzione di una interpolazione di dati in quota possa comportare alcuni problemi, fornendo di fatto risultati non rappresentativi. Infatti, non è detto che, ad esempio, il tetto di un edificio presenti una adeguata distribuzione di punti appartenenti ai due dataset sull'intera superficie, ma può capitare che un lato presenti punti di misura ascendenti e l'altro punti di misura discendenti. In questo caso applicare le tecniche di interpolazione non è consigliato poiché di fatto ne risulterebbe una estrapolazione, piuttosto che una interpolazione. L'utilizzo delle tecniche di interpolazione andrebbe sostanzialmente limitato all'interno dell'involucro convesso (*convex hull*) dei punti. Si fa inoltre notare che la scelta dei punti da selezionare per effettuare l'interpolazione spaziale deve essere tarata in base alla scala alla quale si vuole effettuare l'analisi. Ciò significa che, per analisi a larga scala, la scelta dei punti può essere massimizzata prescindendo dalle loro posizioni in quota, mentre per un'analisi di dettaglio di singolo edificio, che abbia come obiettivo la lettura degli spostamenti che interessano la singola costruzione, è necessario selezionare i punti in relazione al grado di correlazione spaziale del fenomeno. A questo proposito è interessante notare come metodi più avanzati di interpolazione, come i metodi di *kriging*, tengono conto della correlazione spaziale delle deformazioni nell'esecuzione della interpolazione.

Nel seguito vengono introdotte le principali tecniche di interpolazione spaziale, la maggior parte delle quali possono essere eseguite utilizzando alcuni dei numerosi software GIS disponibili (e.g. QGIS, 2020, ArcGIS, 2020).

Esistono due principali categorie di metodi di interpolazione: deterministici e geostatistici (e.g. Davis, 1975, Mitas and Mitasova, 1999). Nei metodi deterministici il legame fra punti vicini è espresso da una legge esplicita i cui parametri hanno significato fisico. Un esempio di tecnica di interpolazione deterministica è la distanza

inversa ponderata (*Inverse Distance Weighted*, IDW), che crea superfici da punti misurati in base all'estensione della somiglianza. Nei metodi geostatistici (o stocastici), il legame fra punti vicini è espresso da un legame statistico, che non necessariamente ha un significato fisico. Un esempio sono le tecniche di *Kriging*.

In funzione del numero dei punti e della loro distribuzione su una data area, i metodi di interpolazione si possono suddividere anche in locali e globali. I locali tengono conto solo di un certo numero di punti nell'intorno del punto in cui si vuole stimare il valore. I globali, invece, utilizzano tutte le informazioni a disposizione per la stima di tutti i valori del modello e prevedono oneri computazionali elevati. Nel primo caso, una variazione di un dato di input influenza l'output solamente all'interno della finestra di indagine locale, mentre nel secondo caso una variazione di un singolo dato di input influenza l'intera superficie di output (Figura 3.11).

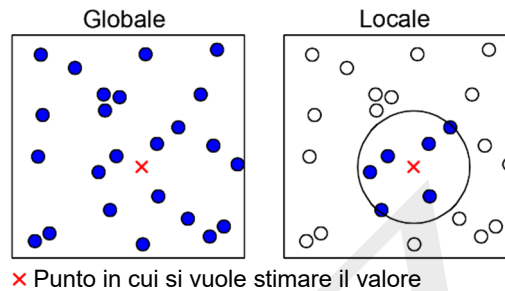


Figura 3.11 – Confronto tra punti considerati nei metodi di stima globali e nei metodi di stima locali

Non è possibile indicare quale sia il metodo di interpolazione più appropriato in assoluto per le diverse applicazioni pratiche di utilizzo dei dati satellitari, a causa della complessità e dell'eterogeneità dei dati satellitari stessi, e della presenza di rumori o discontinuità nelle acquisizioni. Tuttavia, è importante valutare quale metodo sia più adatto in funzione della tipologia di dato disponibile e del tipo di risultato che si vuole ottenere.

3.4.1 Metodi deterministici

Di seguito vengono descritti alcuni tra i metodi di interpolazione deterministici più utilizzati: *Inverse Distance Weighting* (IDW), *Triangulated Irregular Network* (TIN) e *Spline*.

Nel metodo IDW, il valore in un punto viene stimato calcolando una media dei valori dei punti più vicini, pesati in base alla distanza dal punto stesso entro un intorno di ricerca (Figura 3.12). I pesi sono proporzionali all'inverso della distanza tra il punto misurato e la posizione di previsione, elevata ad un esponente, in genere assunto pari a 2. All'aumentare della distanza, i pesi diminuiscono con velocità legata all'esponente. Per esponente pari a 0, non si ha decremento del peso con l'aumento della distanza e la predizione risulterà uguale alla media dei punti campionati che si trovano nell'intorno di ricerca. Al contrario, maggiore è l'esponente, tanto maggiore sarà la velocità di riduzione dei pesi: per valori dell'esponente significativamente elevati, solo i punti nell'immediata vicinanza influenzano il valore predetto. In alternativa, i punti più vicini da considerare si possono fissare in numero, con un approccio del tipo *nearest neighbors*, nel caso di punti disposti in maniera irregolare; ovvero si può definire una finestra mobile in forma e dimensioni che contenga i punti da considerare. Se i dati non presentano direzioni preferenziali, è consigliabile considerare punti in un intorno circolare della posizione in cui si vuole prevedere il valore. Il numero di punti da considerare si sceglie in base alla precisione che si richiede, tenendo conto che all'aumentare del numero di punti aumenta anche il carico computazionale. Per limitare il numero di punti considerati per il calcolo si fissano alcune "barriere", ossia elementi lineari oltre i quali i punti non vengono presi in considerazione per la stima. La presenza di tali limiti fa sì che l>IDW si collochi tra i metodi di stima locale. L>IDW ha il vantaggio di essere un metodo di stima molto rapido. Tuttavia, la superficie di interpolazione che ne risulta è strettamente legata alla funzione peso usata ed al numero di punti scelti per la stima, e risente della presenza di trend globali e clusters nei dati. La tecnica IDW è un interpolatore esatto, cioè prevede un valore identico al valore misurato in una posizione

campionata. I valori previsti non possono essere maggiori o minori del massimo e del minimo valore misurato, rispettivamente. Uno dei limiti dell'IDW, comune per altro a tutti i metodi deterministici, può essere identificato nel fatto che non fornisce errori standard di previsione.

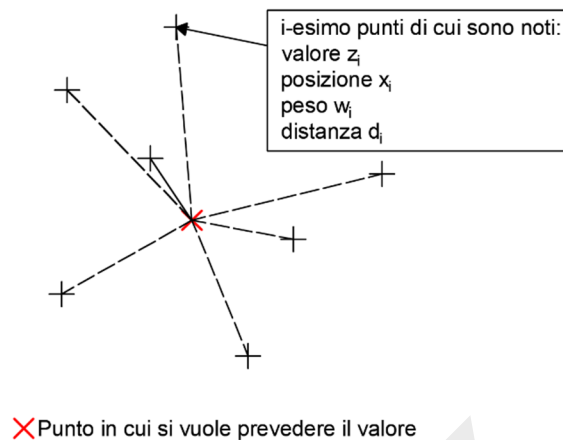


Figura 3.12 – IDW: l'influenza sulla stima è data dalla distanza del punto in cui si vuole prevedere il valore, rispetto al punto *i*-esimo

La tecnica TIN è un metodo di interpolazione locale che realizza una maglia triangolare, in cui i punti campionati costituiscono i vertici della maglia, preservando così la precisione del dato di partenza. Il valore di un punto interno ad un qualsiasi triangolo viene calcolato con interpolazione lineare dei vertici del triangolo. È un metodo generalmente veloce, ma non molto accurato. Risulta molto efficace dove ci sono variazioni dei valori da interpolare in piccoli spazi. Nell'applicare questa tecnica ai punti SAR è necessario porre una particolare attenzione legata al fatto che la triangolazione di Delaunay non è applicabile nei casi in cui vi sia più volte lo stesso punto, (i.e. punti multipli, ovvero punti con la stessa posizione planimetrica e diversa quota). Software come Matlab, ad esempio, cancellano i punti multipli (quindi rischiando di perdere informazioni in modo non controllato). È quindi necessario controllare come questa tecnica sia implementata nei diversi software (eliminando punti, facendo una media nei punti multipli, etc.). Spesso, infatti, nell'elaborazione dei dati SAR può capitare di avere punti con la stessa X e Y (questo avviene ad esempio nella tecnica SBAS-DInSAR che fa ricadere punti diversi nella griglia di campionamento e a diverse quote, si veda Appendice 1). La tecnica *Spline* (e.g. Ahlberg et al. 1967, Greville 1969) esegue una stima dei valori attraverso funzioni matematiche definite localmente e opportunamente raccordate. I parametri che costituiscono il metodo *Spline* sono: il tipo di processo di fitting, che può creare una superficie continua o una superficie più rugosa; il peso, che definisce la forma della curva; il numero di punti attorno alla cella utilizzati nel fitting della curva. L'uso di funzioni *Spline* nell'interpolazione spaziale offre il vantaggio di utilizzare pochi punti alla volta. Anche *Spline* di basso grado sono sufficienti per interpolare la superficie in modo abbastanza accurato, perché vengono mantenute tutte le importanti caratteristiche su piccola scala. È un metodo esatto, che restituisce superfici molto smussate, di minima curvatura. Tra gli svantaggi associati a questa tecnica rientra il problema che non è adatta a grandezze che presentano forte variabilità nello spazio; inoltre, introduce anomalie in aree con assenza di dati di input.

3.4.2 Metodi stocastici

Il metodo di interpolazione stocastico più diffuso è il *Kriging*, in tutte le sue forme, e.g. Wackernagel, 2003, Cressie, 1993. Le tecniche di *Kriging* sono tecniche di modellizzazione che utilizzano informazioni sull'autocorrelazione spaziale dei valori misurati, al fine di stabilire numericamente quanto i valori di un certo attributo nei punti campionati siano simili fra loro, a seconda della reciproca distanza. Tali tecniche presumono che almeno alcune delle variazioni spaziali osservate nei fenomeni possano essere modellate da processi casuali con autocorrelazione spaziale.

Il *Kriging* è un interpolatore ottimale, molto vantaggioso dal punto di vista teorico, che fornisce anche una stima dell'errore. Tuttavia, la tecnica è più complessa ed onerosa rispetto ad altri metodi di interpolazione, a parità di dati di input e della finestra di ricerca e necessita l'utilizzo di software di calcolo che eseguano l'interpolazione a partire dai dati inseriti dall'utente (ad esempio QGIS o ArcGIS).

Una delle ipotesi base del *Kriging* è che la variabile da interpolare sia spazialmente omogenea, ossia vari in modo continuo tra un punto e il seguente, quindi punti lontani non sono dipendenti statisticamente, ma punti vicini sono spazialmente correlati. Pertanto, prima di applicare un metodo di *Kriging*, è necessario studiare il comportamento spaziale del fenomeno da interpolare al fine di identificare aree a comportamento omogeneo, che vanno identificate e studiate a parte.

La variabilità spaziale dei dati è quantificata tramite il semivariogramma calcolato empiricamente dai dati puntuali iniziali. Si suppone di poter dividere il segnale (correlato) dal rumore (incorrelato) attraverso la conoscenza della funzione di covarianza del segnale. I dati "empirici" del variogramma devono essere interpolati con una funzione "modello" che possiede determinati requisiti. Le più utilizzate sono le funzioni sferica, esponenziale, lineare, gaussiana, etc., Figura 3.13. I parametri delle funzioni che si usano per modellizzare il variogramma empirico possono venire stimati con diverse procedure, quali i minimi quadrati pesati, ovvero il *restricted maximum likelihood*.

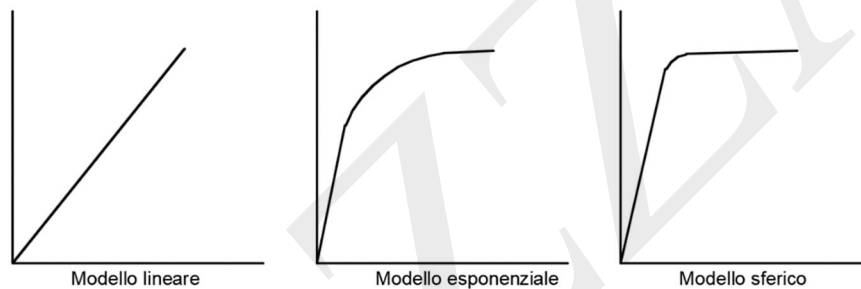


Figura 3.13 – Funzioni "modello" di semivariogramma

Dopo avere studiato la variabilità spaziale dei dati e averla quantificata tramite il semivariogramma calcolato empiricamente a partire dai dati iniziali (e poi interpolato con una opportuna funzione) si passa alla procedura del *Kriging*. Con la procedura del *Kriging* si esegue una stima lineare di minima varianza, in una posizione nella quale il valore della variabile da stimare è incognito. Le ipotesi alla base della procedura sono stazionarietà del processo stocastico e ergodicità del processo stocastico.

A seconda delle ipotesi alla base, è possibile utilizzare diversi tipi di *Kriging*, tra cui i maggiormente diffusi sono:

- *Kriging Semplice*;
- *Kriging Ordinario*;
- *Kriging Universale*;
- *Kriging Empirico Bayesiano (EBK)*.

Nei metodi di *Kriging*, la variabile di interesse $Z(s)$ è scomposta, in ogni posizione di stima (s), in una media deterministica $\mu(s)$ ed un errore casuale autocorrelato $\varepsilon(s)$:

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s) \quad (12)$$

I diversi tipi di *Kriging* si basano su variazioni di questa formula.

Quando la media è una costante incognita, il *Kriging* si definisce *Ordinario*. È un metodo di previsione semplice e flessibile, ma non sempre è ragionevole assumere che la media sia costante. È una tecnica adatta a dati che sembrano avere un'unica tendenza. Un suo limite consiste nel fatto che tale metodo non è adeguato per i dataset in cui si riscontra la presenza di più di un trend o di bruschi cambiamenti nei valori dei dati.

Quando la media è completamente nota, che sia costante o meno, il *Kriging* si definisce *Semplice*. Essendo nota la media, è noto anche l'errore casuale autocorrelato, dunque la stima dell'autocorrelazione sarà migliore

rispetto al caso in cui l'errore viene stimato. Quando la media è una funzione deterministica e i coefficienti della regressione sono incogniti, il *Kriging* si definisce *Universale*.

Il *Kriging Empirico Bayesiano* (EBK) è un metodo di interpolazione geostatistica che automatizza gli aspetti più difficili della costruzione di un modello di *Kriging*, richiedendo una modellazione interattiva minima. Rispetto ad altri metodi di analisi, nell'EBK gli errori standard di previsione vengono valutati con maggiore accuratezza. L'EBK consente previsioni accurate di dati moderatamente non stazionari e di piccoli set di dati. In un EBK è necessario definire tre parametri che non compaiono in altri metodi di *Kriging*: il numero massimo di punti in ciascun sottoinsieme, al crescere del quale aumenta il tempo necessario per eseguire la procedura; il fattore di sovrapposizione tra i sottoinsiemi, cioè il numero medio di sottoinsiemi in cui cadrà ciascun punto; infine, il numero di semivariogrammi che verranno simulati per ciascun sottoinsieme. Il tempo di elaborazione è maggiore rispetto ad altri metodi di *Kriging*, ed aumenta rapidamente all'aumentare del numero di punti di input, della dimensione del sottoinsieme o del fattore di sovrapposizione, oltre che con l'applicazione di una trasformazione. All'aumentare del numero di punti e/o del numero di simulazioni le previsioni diventano più precise. I parametri del semivariogramma, che definisce come la somiglianza tra i punti diminuisca con la distanza, nell'EBK sono stimati utilizzando la *restricted maximum likelihood* (REML). A causa delle limitazioni computazionali della REML per insiemi di dati di grandi dimensioni, i dati di input vengono prima divisi in sottoinsiemi sovrapposti di una dimensione specificata. In ogni sottoinsieme, poi, i semivariogrammi sono stimati nel modo seguente: inizialmente viene stimato un semivariogramma a partire dai dati nel sottoinsieme. Utilizzando questo semivariogramma come modello, i nuovi dati vengono simulati incondizionatamente in ciascuna delle posizioni di input nel sottoinsieme. Un nuovo semivariogramma viene stimato a partire dai dati simulati. Questi ultimi due passaggi vengono ripetuti un numero specificato di volte. In ogni ripetizione, il semivariogramma stimato nel primo passaggio viene utilizzato per simulare una nuova serie di dati nelle posizioni di input e i dati simulati vengono utilizzati per stimare un nuovo semivariogramma. Questo processo crea un gran numero di semivariogrammi per ciascun sottoinsieme. Per ciascuna posizione in cui si vuole prevedere il valore, la previsione viene calcolata utilizzando una nuova distribuzione di semivariogrammi generata da un campionamento basato sulla probabilità di singoli semivariogrammi dagli spettri di semivariogramma nelle vicinanze del punto. Ad esempio, se una posizione di previsione ha vicini in tre diversi sottoinsiemi (come specificato dal quartiere di ricerca), la previsione verrà calcolata usando alcuni semivariogrammi simulati da ciascuno dei tre sottoinsiemi; questi semivariogrammi sono scelti probabilisticamente in base ai loro valori di probabilità.

L'EBK non fa sì che i dati seguano una media complessiva, i valori che si discostano dalla media hanno la stessa probabilità di aumentare quanto lo sono di ridursi.

L'EBK può essere eseguito con diversi tipi di semivariogrammi: lineare, esponenziale, *thin plate spline*. La chiave per ottenere risultati affidabili è scegliere il semivariogramma che più si avvicina al comportamento del fenomeno. Ogni semivariogramma presenta vantaggi e svantaggi. Quando si sceglie un semivariogramma, è necessario tenere conto del tempo di calcolo e della flessibilità del modello (la capacità di adattarsi con precisione a una vasta gamma di set di dati).

Il tecnico che voglia applicare una tecnica di interpolazione stocastica può fare affidamento su diversi software nei quali è necessario definire solo i parametri di input.

3.5 ELABORAZIONE DEI DATI NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA

Premesso che al paragrafo 3.3.1 è già stata trattata l'analisi dei dati nel dominio del tempo, nel seguito in maniera duale si discute l'analisi dei dati nel dominio della frequenza e, per estensione, in quello congiunto tempo-frequenza.

Prima di iniziare la trattazione è tuttavia doveroso ricordare al lettore che ogni tipo di elaborazione di dati, che nel presente paragrafo viene effettuata con tecniche che ricorrono all'analisi nel dominio della frequenza, ma ciò è vero in generale anche per le tecniche che trovano le loro basi nel dominio del tempo e in altri domini

(e.g. tempo-scala/risoluzione), è subordinato al trattamento o ai trattamenti preliminari atti a rendere gli stessi dati sfruttabili per il singolo fine.

Si ricorda che, nel caso specifico, in realtà il dato di spostamento lungo la LOS deriva da un trattamento della misura effettuata dal radar sintetico, e dunque esso sarà subordinato alle limitazioni di quel trattamento, e.g. processi di *smoothing* e regolarizzazione, ipotesi di autocorrelazione dei dati ed esistenza all'interno dei data-set, etc. (ipotesi che dovranno essere verificate per capire se il dato è realmente sfruttabile per fini strutturali). Dunque, assunte queste ipotesi compatibili con gli utilizzi strutturali (almeno in un primo momento), è necessario elencare alcune problematiche che si potrebbero incontrare durante l'ulteriore trattamento del dato di spostamento lungo la LOS:

- Il data-set di spostamenti lungo la LOS si riferisce a un campione elevato di punti (dell'ordine della decina di milioni di punti) e un'azione doverosa dovrebbe concentrarsi sull'eliminazione di tutti quei punti sorti da artefatti di elaborazioni precedenti o di quei punti poco significativi per analisi successive (e.g. punti che ricadono su pali della luce, etc.). Questa operazione, che può essere svolta solamente con tecniche automatiche vista la numerosità dei dati, potrebbe comportare l'eliminazione dal data-set di alcuni punti effettivamente utili e significativi per le analisi successive o potrebbe essere non totalmente efficace e produrre data-set con rimanenze di punti parassita. Per utilizzare i dati di spostamento lungo la LOS in modo affidabile e robusto queste operazioni devono essere effettuate in modo preliminare. Se non applicate a tutto il data-set, dovrebbero essere implementate per l'area di studio sulla quale si vogliono utilizzare le tecniche di analisi nel dominio della frequenza, del tempo e in altri domini.
- Il data-set di spostamenti lungo la LOS presenta un elevato numero di *missing-points*. Questo determina un tempo di campionamento non uniforme e dunque la necessità di ricorrere a tecniche di ricampionamento e interpolazione temporale nel caso si volessero rielaborare i dati. Si pensi ad esempio a una semplice operazione di gradiente (temporale) numerico per ottenere i profili di velocità lungo la LOS. Un divario eccessivo fra due dati consecutivi potrebbe comportare, ad esempio, una sottostima della velocità per un certo *range* temporale (intendendo qui come velocità il gradiente dello spostamento, e non la pendenza della regressione lineare del dato di spostamento, che sarà tuttavia dipendente dalle operazioni di ricampionamento e interpolazione, soprattutto nel caso i dati presentino forti tendenze non lineari). Il ricampionamento, inoltre, potrebbe modificare il contenuto in frequenza dei segnali. A tal proposito un'azione consigliata è quella di ricampionare i segnali al tempo di campionamento medio, ciò permetterebbe, secondo Nyquist la ricostruzione fedele di segnali con campionamento non uniforme. Ovviamente tutte queste operazioni possono avere ripercussioni sulle elaborazioni successive.
- Il data-set di spostamenti lungo la LOS è influenzato da tutta una serie di variabili ambientali e operative (*Environmental and Operational Variations – EOVS*) la cui natura è per ora oggetto di studio. Dunque, i risultati dei processamenti saranno influenzati dalla natura di queste variazioni che dovrebbero essere considerate per ottenere stime affidabili e robuste. Un elenco non esaustivo di potenziali azioni, naturali e antropiche, che potrebbero modificare il dato di spostamento lungo la LOS sono:
 - Eventi rari: come terremoti, alluvioni, uragani, incendi, crolli catastrofici del sottosuolo, ecc.
 - Eventi periodici: come piogge, neviccate, variazioni di temperatura, variazioni di umidità relativa e pressione atmosferica, variazioni delle condizioni del suolo dovute a fattori ambientali, ecc.
 - Eventi persistenti: come cedimenti, vento, traffico veicolare e altre vibrazioni antropiche, effetto dei moti di marea e altri fenomeni a bassissima frequenza che agiscono sulla terra, ecc.
- L'elaborazione dei dati è poi soggetta a limitazioni di natura statistica. Il campione temporale dei dati di spostamento lungo la LOS evidenzia una numerosità pari a circa un centinaio di valori per singola sequenza temporale. Ciò è dovuto principalmente a una bassa durata temporale delle registrazioni se

comparata con il tempo di campionamento medio delle stesse registrazioni. Se da un lato la durata del segnale è vincolata dallo scorrere del tempo, dall'altro il tempo di campionamento medio è un dato non modificabile a posteriori. Dunque, è doveroso sottolineare che tutte le tecniche nate per applicazioni strutturali (che solitamente si affidano a campioni con pluri-centinaia, migliaia o decine di migliaia di valori per storia temporale) potrebbero risultare instabili, e poco affidabili, se applicate ai data-set di spostamento lungo la LOS. Ciò è vero anche perché con sequenze relativamente corte (basso rapporto durata/tempo di campionamento) è difficile riconoscere dei pattern stabili e determinare l'insorgenza di anomalie (del segnale) nel periodo di osservazione. Sicuramente il tentativo di ridurre il tempo di campionamento e stabilizzare il suo valore è una di quelle azioni su cui si potrebbe investire con sforzi futuri.

- Il data-set di spostamenti lungo la LOS presenta una localizzazione incerta (su una maglia dell'ordine di 3 x 3 m). Ciò è in contrasto con ogni tipo di tecnica utilizzata comunemente nel monitoraggio strutturale. Con le tecniche comunemente usate infatti, il punto di acquisizione su cui è installato un sensore rimane stabile nel tempo. Nel caso dei dati satellitari il punto può subire una variazione di posizione e quindi aggiungere incertezza al dato temporale di partenza, incertezze che non sono comunemente prese in considerazione dalle tecniche tradizionali.

L'elenco, non esaustivo, delle problematiche di elaborazione vuole dunque essere un campanello di allarme sul fatto che ogni tipo di elaborazione successiva sarà soggetta alle già menzionate problematiche / limitazioni, incluse le tecniche nel dominio del tempo, frequenza, tempo-frequenza, etc.

Molte serie temporali, comprese quelle costituite da dati interferometrici satellitari, mostrano comportamenti periodici anche molto complessi. A tal riguardo, l'analisi nel dominio della frequenza fa leva su una famiglia di tecniche che consentono di studiare le caratteristiche di periodicità delle serie. Questa analisi, detta anche spettrale, implica la trasformazione dei dati dal dominio del tempo, dove vengono naturalmente osservati e registrati, al dominio della frequenza. Ciò si realizza attraverso una trasformazione ortogonale, che preserva l'energia (o la norma) del segnale.

I dettagli tecnici dell'analisi spettrale si trovano in molti testi, ad esempio un riferimento classico è quello di Priestly (1981). In breve, la covarianza delle serie temporali viene rappresentata da una funzione nota come densità spettrale. La relazione tra la funzione di densità spettrale e la sequenza di autocovarianze, che è riassunta nel teorema di Wiener-Khintchine, fornisce un collegamento tra l'analisi nel dominio del tempo e quella nel dominio della frequenza. La sequenza delle autocovarianze può essere ottenuta dalla trasformata di Fourier della funzione di densità spettrale e la funzione di densità spettrale è, al contrario, la trasformata di Fourier dell'autocovarianza.

La densità spettrale può essere stimata utilizzando uno strumento noto con il nome di periodogramma, che è la correlazione tra le serie temporali e le funzioni seno/coseno alle diverse frequenze. All'aumentare della lunghezza della serie, il periodogramma è approssimativamente indipendente per frequenze distinte (Shumway e Stoffer, 2017). Questa indipendenza può essere migliorata, così come la qualità visiva e l'interpretabilità della rappresentazione, applicando una finestra rettangolare mobile che dà luogo al periodogramma di Bartlett o con finestre diverse, che applicano una sorta di media mobile ponderata (se la finestra mobile è gaussiana si trova il celebre periodogramma di Welch).

Tuttavia, l'analisi in frequenza, come la trasformata di Fourier, è raramente adatta per l'elaborazione di serie non stazionarie o di quelle il cui contenuto di frequenza cambia nel tempo. Una possibile contromisura sarebbe quella di suddividere la serie in segmenti temporali più piccoli e analizzare il contenuto in frequenza di ogni singola frazione. Per un'analisi multirisoluzione esiste ad esempio la trasformazione *wavelet* con la possibilità di dilatazione e traslazione delle onde come funzione di base della trasformazione (Aubry e Jaffard, 2003). Ancora più generale ed efficace per l'analisi di comportamenti non-stazionari e anomalie delle serie temporali è l'analisi nel dominio congiunto tempo-frequenza, di cui al paragrafo successivo.

Vi sono poi analisi che sfruttano il dominio del tempo (e.g. *sample entropy*), della frequenza (e.g. *spectral entropy*) e del dominio congiunto tempo-frequenza (e.g. *instantaneous spectral entropy*) di più nuova

concezione nel campo del monitoraggio strutturale, e basano i loro concetti sulla definizione di una grandezza della teoria dell'informazione: l'entropia. Essa rappresenta la misura di informazione media del segnale e viene utilizzata per stimare la complessità dei segnali. L'uso dell'entropia spettrale nel campo dello *Structural Health Monitoring* si basa sull'ipotesi che la presenza di danneggiamento incrementi la complessità del sistema (Farrar et al., 2010). Il concetto di complessità è stato meglio spiegato per il campo del monitoraggio strutturale da (West et al., 2019), fornendo metodi per quantificare il suo valore, appoggiandosi per esempio a note definizioni provenienti dalla teoria dell'informazione (Donajkowski et al., 2020). Fra le varie definizioni, molto interessanti ed emergenti per le applicazioni del monitoraggio sono quelle basate sulle distribuzioni in frequenza o entropie spettrali (Amiri e Modarres, 2014, Das e Leung, 2018, Lin e Chien, 2019, Ceravolo et al., 2019).

3.5.1 Analisi nel dominio congiunto tempo-frequenza

La rappresentazione di un segnale può essere altresì effettuata in un dominio congiunto tempo-frequenza, che corrisponde a mappe bidimensionali di energia istantanea spettrale del singolo segnale, che nel caso specifico è rappresentato da uno spostamento lungo la LOS o da sue proiezioni e derivazioni. Esistono diversi modi per definire un'energia istantanea spettrale cui corrispondono altrettante rappresentazioni in tempo frequenza (Cohen, 1989 e Boashash, 1990). Il modo più noto e intuitivo per definire una rappresentazione tempo-frequenza è quello di introdurre una finestra temporale (*running window*) ed effettuare una semplice *Fast Fourier Transform* (FFT) in funzione del tempo, su cui la finestra di analisi è centrata. Il diagramma di densità di energia che ne risulta, detto spettrogramma, è spesso rappresentato in modalità contour o mesh, dove gli assi del piano di riferimento sono il tempo e la frequenza, Figura 3.14. Il grafico viene comunemente costruito a valle della rimozione di media e trend del segnale. Ogni grafico si riferisce a un punto monitorato (contraddistinto da valore di longitudine, latitudine e altezza topografica) e può essere costruito sia per orbite ascendenti che discendenti.

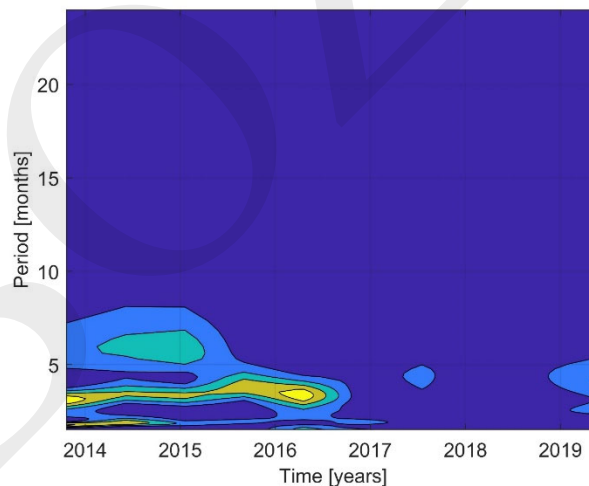


Figura 3.14 – Esempio di spettrogramma di spostamento LOS

3.5.2 Analisi di entropia spettrale

In generale, l'entropia spettrale può essere utilizzata per determinare quanto un segnale si avvicina alla condizione di rumore bianco. Nel caso in cui il segnale derivi da un sistema meccanico, tuttavia, la lettura dell'output da un sistema di monitoraggio determina intrinsecamente la presa in conto di due fattori: (i) perturbazioni esterne e (ii) il filtro operato dal sistema. Tanto più una perturbazione esterna assume un comportamento non stocastico, tanto inferiore sarà il valore di entropia spettrale. Dato un segnale generico, proveniente o meno da un sistema strutturale, l'entropia spettrale viene calcolata a partire dalla trasformata di Fourier del segnale stesso, nel caso si ricerchi una stima dell'entropia dell'intero segnale, o dal suo

spetrogramma, nel caso si sia interessati a una stima istantanea dell'entropia. L'entropia spettrale può essere stimata attraverso diverse definizioni fornite dalla teoria dell'informazione.

Assumendo la definizione di Shannon si ottiene la *Shannon Spectral Entropy* (SSE). In questo caso, assunto con $x(t)$ un generico segnale nel tempo, calcolata la trasformata di Fourier del segnale $X(f)$, è possibile valutare lo spettro di potenza come $S(f)=|X(f)|^2$, dove t e f indicano rispettivamente il tempo e la frequenza. Calcolato lo spettro di potenza del segnale, la SSE tratta il suo valore normalizzato come una distribuzione di probabilità delle frequenze del segnale. Per ulteriori dettagli si rimanda alla letteratura specifica (Pan et al., 2009, Sharma e Parey, 2016, Shen et al., 1998, Vakkuri et al., 2004).

Ai fini dell'applicazione di SSE a dati satellitari di tipo interferometrico (es. spostamenti lungo la LOS) l'entropia spettrale può essere rappresentata e interpretata agevolmente mediante l'uso di mappe. Indifferentemente dall'orbita scelta, la mappa rappresenta come l'entropia varia sul territorio, definendo un valore di colore per ogni punto caratterizzato da longitudine, latitudine e altezza topografica. Siccome è possibile che due o più punti abbiano stessa longitudine e latitudine ma diversa altezza topografica, la mappa è utile per rappresentare vaste aree in quanto gli errori di sovrapposizione (se pur limitati dall'uso di trasparenze) vengono mascherati dalla distribuzione spaziale della variabile. Ciò che si ottiene è quindi una mappa colorata in funzione di longitudine e latitudine. È possibile ottenere mappe per un arco temporale così come per ogni istante di osservazione. In questo secondo caso, al monitoraggio della variabile in funzione dello spazio si aggiunge la possibilità di controllare come l'entropia su un territorio varia nel tempo. La mappa può essere rappresentata in funzione di immagini satellitari o altri *background*, tra i quali risulta molto utile quello topografico, in grado di evidenziare, tra l'altro, le infrastrutture viarie, Figura 3.15.

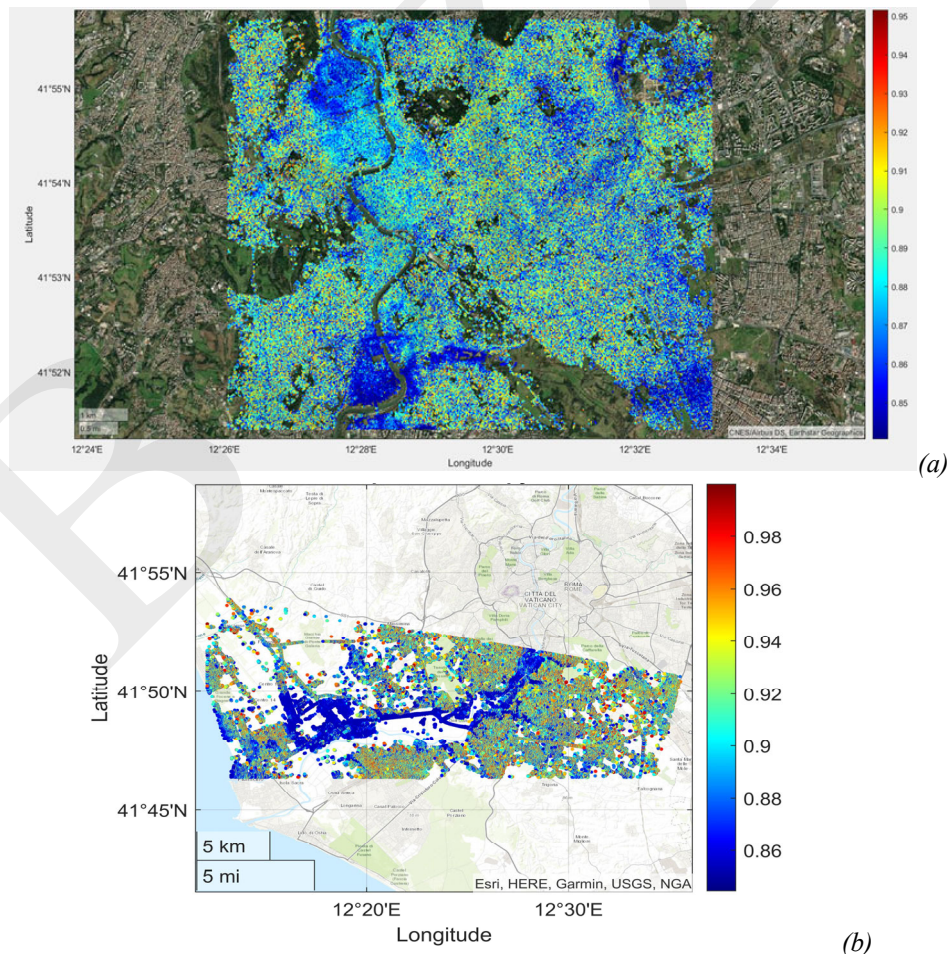


Figura 3.15 – Esempio di rappresentazione di entropia spettrale di spostamento lungo la LOS: (a) background satellitare; (b) background topografico. Le immagini si riferiscono all'entropia media nella finestra di osservazione dei dati provenienti dalle orbite discendenti

Oltre all'utilizzo di mappe, l'entropia spettrale può essere rappresentata anche mediante diagrammi in funzione del tempo o di altre variabili. In questo caso, l'andamento dell'entropia spettrale nel tempo rappresenta in ordinata il valore di entropia del segnale analizzato (quantità adimensionale), normalizzata all'entropia del corrispettivo rumore gaussiano calcolato per segnali discreti. In ascissa riporta invece le date di acquisizione di un particolare campione, Figura 3.16. Ogni grafico è associato a un valore di latitudine, longitudine e altezza topografica, così che l'andamento si riferisce a uno specifico punto osservato da satellite. Sovrapposto al grafico dell'entropia si rappresentano, con segmenti orizzontali, i valori medi di entropia calcolati su finestre temporali aventi medie sensibilmente diverse fra di loro. L'intersezione tra la congiungente dei segmenti rappresentanti i valori medi a tratti e la linea rappresentante il valore di entropia spettrale fornisce un *changing point*, ossia un punto (istante temporale) a seguito del quale lo spettro del segnale osservato ha cambiato le sue caratteristiche di dispersione attorno alle frequenze fondamentali. I *changing points* sono utili per rilevare anomalie nel segnale nella finestra temporale di osservazione (ad esempio, *novelty detection*), intendendo per anomalia un evento raro (ossia con occorrenza limitata) nel periodo di osservazione. L'entropia spettrale può essere calcolata in funzione delle bande dello spettro che si vogliono analizzare. Risulta utile, ad esempio, separare la rappresentazione dell'entropia nelle componenti alte e basse dello spettro. L'entropia *high-pass* darà dunque informazioni su come variano le componenti in frequenza superiori a una certa frequenza di *cut-off*, al contrario l'entropia *low-pass* darà informazioni su come variano le componenti in frequenza inferiori alla stessa frequenza di *cut-off*. In caso di scomposizione dell'entropia in *high-pass* e *low-pass*, le medie a tratti e i *changing points* si riferiscono alla componente *high-pass*, essendo la componente *low-pass* tendenzialmente più stabile e associata a fenomeni lenti.

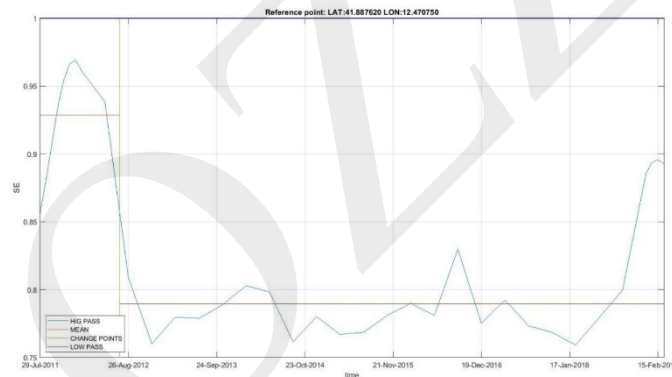


Figura 3.16 – Esempio di diagramma di entropia spettrale nel tempo

Un secondo diagramma riguardante le grandezze entropiche è il diagramma a dispersione, Figura 3.17. In questo diagramma si riportano due variabili temporali, la prima in ascissa e la seconda, rappresentate l'entropia spettrale, in ordinata. La particolarità del grafico è che invece di riferirsi a un unico punto monitorato da satellite (contraddistinto da longitudine, latitudine e altezza topografica), rappresenta l'andamento di un sistema (ad esempio, un edificio). Un esempio di variabile riportata in ascissa è l'energia del segnale. Al diagramma di dispersione viene sovrapposta una linea di regressione di un modello definito a priori. Le curve di dispersione possono riferirsi a un intero arco temporale o essere raffigurate in funzione del tempo, ricorrendo a stime istantanee dell'entropia spettrale. In quest'ultimo caso si otterrebbe una nuvola di punti in uno spazio tridimensionale, dove la terza dimensione è rappresentata dal tempo. I valori in ascissa e ordinata possono essere raffigurati in un piano bi-logaritmico per facilitarne la lettura.

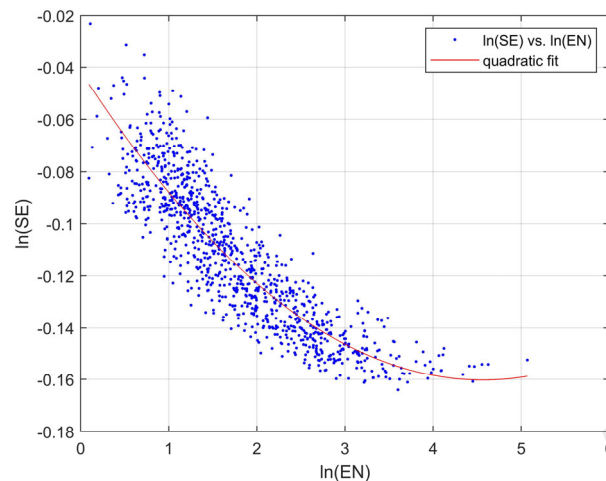


Figura 3.17 – Esempio di diagramma di dispersione entropia spettrale-energia del segnale in scala bi-logaritmica

3.6 INTEGRAZIONE DEI DATI SAR CON RETI GNSS

Come ampiamente descritto nelle sezioni precedenti, il risultato ottenibile dalla interferometria SAR è estremamente interessante perché consente di stimare con ottima risoluzione spaziale le deformazioni del territorio a partire da alcune condizioni al contorno iniziali che però costituiscono anche un limite della tecnica stessa. Le mappe di deformazioni derivanti dall'interferometria SAR sono infatti sempre riferite ad un punto di riferimento assunto stabile e quindi non in movimento.

A questo riguardo, è possibile migliorare la qualità dei dati ottenibili dall'interferometria satellitare integrando altre tipologie di misura. Nell'ambito della geodesia spaziale, la tecnologia GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) ha subito una evoluzione in termini di prestazioni tale da diventare de facto la tecnologia principe per il posizionamento di precisione, con riferimento a ricevitori capaci di acquisire le fasi portanti dei segnali inviati dalle differenti costellazioni e, attraverso una elaborazione particolarmente sofisticata, consente di stimare posizioni con precisione fino a pochi millimetri. Per raggiungere tali precisioni sono stati definiti sistemi di riferimento sempre più precisi ed accurati che ora costituiscono standard internazionali. Ovviamente la posizione stimata con tali precisioni è quella dell'antenna che ha acquisito i dati. Non solo sul territorio nazionale ma in generale in tutto il globo antropizzato sono state installate reti di stazioni GNSS permanenti che acquisiscono con regolarità i dati e che risultano una base efficace per finalità di monitoraggio.

È dunque facile intuire come DInSAR e GNSS possano essere per molti versi complementari e, laddove sono presenti stazioni GNSS permanenti, è possibile considerare questi dati per riallineare le risultanze dell'interferometria e riportarla su sistemi di riferimento ben definiti, a vantaggio di una migliore comprensione del contenuto informativo degli interferogrammi.

Esistono studi sulle modalità di combinazione dei dati e il principale problema è legato al fatto che non sempre in corrispondenza dell'antenna GNSS è presente un PS da utilizzarsi per la calibrazione. Certamente però la comunità scientifica è allineata sul fatto che la combinazione delle due tecnologie sia quella che porterà in futuro i maggiori benefici nelle tematiche sopra indicate.

È anche possibile accoppiare dispositivi passivi retroriflettenti a stazioni permanenti GNSS, ma tali dispositivi devono essere opportunamente dimensionati a seconda della lunghezza d'onda del segnale del satellite che devono riflettere. Tale aspetto è potenzialmente critico in quanto le lunghezze d'onda nel corso degli anni si sono sempre modificate per migliorare le prestazioni dei sistemi.

3.7 ASPETTI E POSSIBILI CRITICITÀ IN FASE DI ELABORAZIONE DEI DATI

In questo paragrafo vengono riportate alcune considerazioni su possibili criticità e/o problematiche che possono verificarsi nella fase di elaborazione delle misure satellitari per scopi di monitoraggio ed analisi

strutturale. Inizialmente, si propone un focus sui fenomeni e sulle criticità che hanno un impatto sulle scelte effettuate dall'utente finale nell'ambito dell'elaborazione dei risultati interferometrici.

Un primo limite del dato SAR, come più volte ribadito, risiede nel fatto che la componente dello spostamento (ovvero della velocità media) restituito è diretta lungo la LOS (cfr. Figura 3.3). Di conseguenza, nel caso peggiore in cui lo spostamento reale fosse perpendicolare alla LOS, la misura ottenuta dall'esame dei dati SAR risulterebbe nulla. Tale aspetto assume una particolare rilevanza nei casi in cui le elaborazioni si basino solo su informazioni da un dataset (ascendente o discendente). Infine, a causa del fatto che la LOS di entrambe le orbite ascendenti e discendenti è sostanzialmente contenuta nel piano verticale E-W, in generale non si possono stimare eventuali spostamenti/velocità in direzione N-S.

Una ulteriore considerazione riguarda l'estensione dell'area sulla quale produrre mappe di interpolazione. Essa può essere molto diversa in funzione dello scopo che si vuole perseguire. È possibile, ad esempio, studiare aree vaste (analisi a larga scala) ai fini di protezione civile, per individuare le zone più a rischio da poter indagare successivamente più nel dettaglio. In questo caso, si potrebbe fare ricorso a metodi di interpolazione globali. Qualora, invece, si vogliano creare mappe di velocità media o di spostamento con riferimento ad un singolo manufatto o piccoli agglomerati, è preferibile utilizzare metodi di stima locali, in quanto potrebbero essere in atto fenomeni deformativi localizzati del terreno, e l'utilizzo di tutti i valori del dataset potrebbe falsare le previsioni. Il metodo di stima locale più semplice da implementare per ottenere una mappa di previsione è l>IDW. Quando, invece, si vogliono ottenere stime più precise di funzione e di errore, usualmente conviene adottare una tecnica di interpolazione geostatistica (e.g. *Kriging*).

I dati SAR sono uno strumento potente per la ricostruzione della storia di spostamento di un manufatto; a partire dalla sua costruzione, potendo far emergere eventuali cedimenti strutturali, se occorsi, o palesando le benefiche conseguenze di eventuali interventi di consolidamento. Tale ricostruzione può essere eseguita mediante una attenta elaborazione delle serie storiche di spostamento di punti che sono collocati sul manufatto stesso, tenendo anche in conto di cambi di trend, ad esempio attraverso regressioni lineari a tratti. In alcuni casi, tuttavia, l'utilizzo delle serie temporali complete potrebbe portare a interpretazioni errate delle informazioni di spostamento associate ai punti di misura coerenti (paragrafo 2.6.2), oppure a informazioni differenti a seconda del tipo di approccio interferometrico multi-temporale utilizzato per l'analisi delle deformazioni del costruito (ad esempio, approcci interferometrici di tipo PSI oppure approcci di tipo *Small Baseline* - SB). Un caso particolare riguarda il caso di edifici o manufatti demoliti durante il periodo di monitoraggio SAR. Per maggiore chiarezza, in Figura 3.18 viene riportato un esempio di distribuzione delle immagini (e dei corrispondenti interferogrammi differenziali rappresentati da linee che collegano coppie di immagini) che vengono utilizzati per l'elaborazione interferometrica avanzata nel caso di approcci PSI e approcci SB, che possono portare ad avere informazioni differenti relative allo spostamento dei punti di misura ottenuti. In particolare, in Figura 3.18 sono mostrati gli schemi di rappresentazione nel piano baseline temporale/baseline perpendicolare della distribuzione delle immagini (e dei relativi interferogrammi) utilizzati nell'elaborazione DInSAR multi-temporale in approcci di tipo PSI (a sinistra) o approcci *Small Baseline* (a destra). In tali immagini sono indicate sull'asse delle ascisse le baseline temporali, mentre in quello delle ordinate le corrispondenti baseline perpendicolari; inoltre, i rombi neri rappresentano le immagini mentre le linee nere continue che connettono i vari rombi rappresentano gli interferogrammi differenziali utilizzati. Come già riportato nel paragrafo 2.5.1, gli approcci PSI sono caratterizzati dal fatto di lavorare con una *master* unica e dalla mancanza di vincoli sulle baseline massime da utilizzare nel dataset interferometrico; ciò permette di lavorare con un numero minimo di interferogrammi ottenuti tra la stessa immagine *master* e tutte le altre immagini (Figura 3.18a). Invece, gli approcci SB (Figura 3.18b) sono approcci *multi-master*, per cui si ottiene un numero ridondante di interferogrammi che devono rispettare un vincolo sulle baseline spaziali e temporali, in modo da poter limitare gli effetti di decorrelazione e massimizzare la coerenza (paragrafo 2.6.2). Inoltre, in Figura 3.18 è rappresentata una linea rossa tratteggiata che indica un evento quale ad esempio un crollo, oppure un processo di demolizione. In tale caso, con riferimento ai punti di misura afferenti a tale manufatto, il processo interferometrico potrebbe fornire risultati errati ma valori di coerenza tuttavia ancora elevati. In

particolare, nel caso in cui il crollo/demolizione della struttura interessi un piccolo numero di interferogrammi rispetto all'intero dataset utilizzato (ad esempio, i periodi pre- e post- evento hanno durata significativamente diversa), si corre il rischio di considerare coerenti anche punti di misura evidentemente rumorosi. Di conseguenza, è possibile che anche dopo la demolizione dell'edificio alcuni punti di misura continuino a rispondere in maniera coerente e di conseguenza essi siano presenti nel dataset, come se l'edificio fosse sempre rimasto presente.

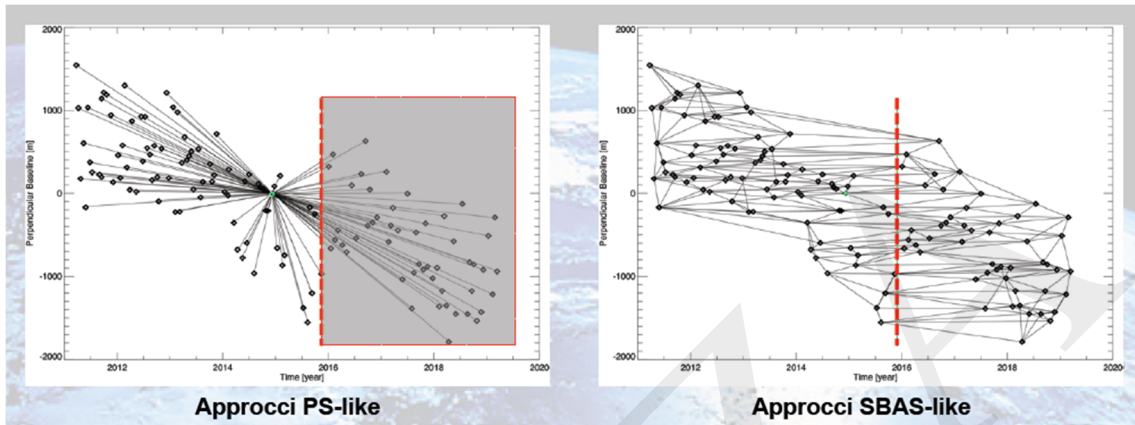


Figura 3.18 – Approccio SBAS vs approccio PS

3.8 SINTESI DEL CAPITOLO E ASPETTI CHIAVE

In questo paragrafo viene riportata una sintesi degli aspetti principali trattati nel capitolo, con particolare riferimento all'utilizzo dei risultati dell'interferometria satellitare nel campo strutturale. Si sono analizzati i dati interferometrici, generalmente rappresentati in termini di punti di misura con una risposta sufficientemente coerente durante il periodo di osservazione. Tipicamente, i punti di misura rappresentano parti di edifici, di strutture metalliche, e in generale di elementi artificiali o naturali, la cui risposta elettromagnetica non varia significativamente tra acquisizione ed acquisizione. Per ogni singolo punto di misura vengono quindi fornite la posizione, l'intera serie temporale di spostamento ed il trend medio di spostamento come spiegato in dettaglio nel capitolo 2.

Per una corretta valutazione dello stato attuale di opere di ingegneria civile come infrastrutture ed edifici, è necessario integrare le informazioni ottenute da più punti di misura, in modo da avere una visione di insieme che riduca le incertezze delle singole letture. Per tale motivo, l'utilizzo e l'elaborazione dei risultati dei dati interferometrici deve essere effettuata utilizzando specifiche tecniche che tengano conto del maggior numero possibile di punti di misura per consentire una interpretazione dei dati ai fini del comportamento strutturale il più affidabile possibile (cfr. capitolo 4 e successivi).

Utilizzando i dati provenienti da un singolo dataset (ascendente o discendente) è possibile ottenere informazioni preliminari per quanto riguarda le deformazioni in atto, anche se tali informazioni risultano di fatto parziali, rappresentando solo la componente di spostamento lungo la LOS: è evidente, quindi, come una assenza di spostamento lungo la LOS non possa escludere a priori la presenza di un processo deformativo nelle direzioni ortogonali alla LOS (per ulteriori dettagli si veda il paragrafo 3.2). Qualora invece si abbiano a disposizione, per la struttura o l'area in esame, i risultati interferometrici per entrambi i datasets (ascendente e discendente), è possibile combinare le loro informazioni al fine di determinare le componenti del moto in direzione verticale ed orizzontale E-W. Si ricorda tuttavia, come dettagliato al capitolo 2, che praticamente nessuna informazione è ottenibile per la componente orizzontale N-S, essendo il sensore radar molto poco sensibile alla misura della componente del moto in tale direzione.

Per effettuare la combinazione delle informazioni (in termini di spostamento, ovvero di velocità media di spostamento) bisogna tenere in conto due aspetti: 1) nella realtà i punti di misura nei due datasets non sono

mai gli stessi; 2) neppure i tempi di campionamento sono gli stessi per i due datasets. Mentre il primo aspetto risulta sempre di cruciale importanza e deve quindi essere affrontato prima di ogni ulteriore elaborazione, il secondo aspetto risulta rilevante soltanto nel caso in cui si vogliano combinare le informazioni delle serie di spostamento, mentre è di scarsa rilevanza nel caso in cui si operi solo sulle velocità medie (ovvero i trend medi delle serie temporali di spostamento). Il primo problema si può affrontare adottando opportune tecniche di ricampionamento spaziale, quali ad esempio tecniche di interpolazione, di sottocampionamento su griglia regolare, di *clustering* ovvero mediante approcci di combinazione di punti sufficientemente vicini. Il secondo problema, invece, necessita di un ricampionamento temporale in modo da definire lo stesso istante iniziale dell'analisi e lo stesso passo di campionamento (preferibilmente uniforme) per i due datasets. Per maggiori dettagli su questi aspetti si rimanda ai paragrafi 3.3 e 3.4.

È possibile, inoltre, fare riferimento a tecniche di elaborazione nel dominio della frequenza o nel dominio tempo-frequenza. Tali tecniche consentono di studiare serie temporali (come quelle rappresentate dai dati interferometrici) con comportamenti periodici anche molto complessi, trasformando i dati dal dominio del tempo, dove vengono naturalmente osservati e registrati, al dominio della frequenza. Per ulteriori approfondimenti su tali tecniche si rimanda al paragrafo 3.5.

È importante poi ricordare che le misure ottenute mediante analisi interferometrica sono misure relative nello spazio e fanno riferimento ad un punto particolare (*Reference Point*) che viene assunto come stabile (i.e. con spostamento nullo per tutta la durata della serie temporale, si veda capitolo 2). È possibile, qualora lo spostamento del punto di riferimento sia non nullo ma noto, ad esempio da misure mediante reti GNSS, elaborare le serie di spostamento dei diversi punti di misura sommando ad esse lo spostamento noto del punto di riferimento.

Infine, alcune ulteriori criticità che possono emergere nell'utilizzo dei dati interferometrici, che devono essere conosciute per una consapevole e razionale elaborazione e conseguente interpretazione dei dati interferometrici, possono essere così elencate (per approfondimenti si rimanda al paragrafo 3.7):

- Particolare attenzione deve essere posta quando si adottano tecniche di interpolazione spaziale, soprattutto per quanto riguarda la scelta dell'area di interpolazione e la selezione dei punti da interpolare: nei casi in cui lo studio riguardi aree vaste (analisi a larga scala) si può fare riferimento a metodi di interpolazione globali selezionando tutti i punti di misura (indifferentemente dal fatto che essi siano afferenti a zone di terreno o a parti di edifici o di infrastrutture); quando invece lo studio riguardi singoli manufatti, è preferibile fare riferimento a metodi di stima locali, in quanto potrebbero essere in atto fenomeni deformativi localizzati del terreno, e considerare quindi tutti i valori del dataset potrebbe falsare le previsioni locali. In quest'ultimo caso, bisogna prestare attenzione alla selezione dei punti (appartenenti al solo edificio, al solo terreno, ovvero ad entrambi), in relazione alla correlazione spaziale dei processi deformativi in atto sul terreno e sul manufatto al fine di una corretta interpretazione del comportamento strutturale (si veda capitolo 4 e successivi).
- Le serie temporali possono evidenziare modifiche del trend medio di spostamento: in tali casi è possibile che il riferimento ad un trend medio dell'intera storia di spostamento possa portare a interpretazioni errate, e risulta preferibile fare riferimento ad altre tecniche di interpolazione come ad esempio interpolazioni lineari a tratti o interpolazioni mediante altre funzioni.
- Nei casi in cui i manufatti subiscano trasformazioni importanti durante il periodo di analisi (e.g. manufatti demoliti o demolizioni parziali, sopraelevazioni, costruzioni di nuove porzioni di edificio/manufatto) è possibile che, a seconda della tecnica interferometrica utilizzata, si abbiano punti di misura posizionati su porzioni del manufatto che erano presenti soltanto in una parte del periodo analizzato. Per tali punti il processo interferometrico potrebbe fornire risultati errati, anche se i valori di coerenza rimangono abbastanza elevati e quindi, apparentemente, il risultato sembrerebbe affidabile. Per esempio, nel caso di un crollo/demolizione della struttura, è possibile che anche dopo il crollo/demolizione alcuni punti di misura continuino a rispondere in modo coerente e di conseguenza essi siano presenti nel dataset come se il manufatto fosse sempre rimasto presente. In tali casi, può

essere utile ri-effettuare il processo interferometrico nei due periodi pre- e post-evento in modo da limitare tali errori.

3.9 RIFERIMENTI

- Ahlberg J. H., Nilson E. N., Walsh J. L. (1967). The theory of splines and their applications. Academic Press, New York. <https://cds.cern.ch/record/222864>
- Amiri M., Modarres M. (2014). An entropy-based damage characterization. *Entropy*, 16(12), 6434–6463.
- ArcGIS (2020). www.esri.com (accessed October 30, 2020)
- Boashash B. (1993). Time-frequency signal analysis. In: S. Haykin. Editor. *Advances in Spectral Analysis*, Prentice-Hall, New Jersey.
- Ceravolo R., Lenticchia E., Miraglia G. (2019). Spectral entropy of acceleration data for damage detection in masonry buildings affected by seismic sequences. *Construction and Building Materials*, 210, 525–539.
- Cigna F. (2010). Applicazione di tecniche interferometriche radar avanzate per la mappatura rapida e il monitoraggio dei dissesti idrogeologici. PhD Thesis, Università di Firenze
- Cohen L. (1989). Time-frequency distributions-a review. *Proceedings of the IEEE*, 77(7), 941-981.
- Cressie N.A.C. (1993) *Statistics for spatial data*, John Wiley & Sons. ISBN 9780471002550
- Das A. K., Leung C. K. Y. (2018). Power spectral entropy (PSE) as a qualitative damage indicator. *Proceedings of the 9th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM-2018)*, Manchester, 10–13.
- Davis J.C. (1975). *Interpolation and approximation*. Dover Publication, New York. ISBN 978-0486624952.
- Donajkowski H., Leyasi S., Mellos G., Farrar C. R., Scheinker A., Pei J.-S., Lieven N. A. J. (2020). Comparison of Complexity Measures for Structural Health Monitoring. In: Zhu M. Editor. *Model Validation and Uncertainty Quantification*. Vol. 3, 27–39. Springer, Cham. ISBN 978-3-030-48778-2
- Farrar C., Park G., Worden K. (2010). Complexity: A new axiom for structural health monitoring?. In: Casciati F., Giordano M. (eds). *Proc. of 5th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Sorrento, Italy
- Foumelis M. (2016). Vector-based approach for combining ascending and descending persistent scatterers interferometric point measurements. *Geocarto International*, 33(1):1-40
- Greville T.N.E. (editor) (1969). *Theory and applications of spline functions*. *Proceedings of an advanced seminar at University of Wisconsin, Madison, October 7-9, 1968*, Academic press- New York.
- Lin T.-K., Chien Y.-H. (2019). Performance evaluation of an entropy-based structural health monitoring system utilizing composite multiscale cross-sample entropy. *Entropy*, 21(1), 41.
- Mitas L., Mitasova H. (1999). Spatial Interpolation. In: P. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire, D.W. Rhind (eds). *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*. 481-492. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-471-73545-8
- Pan Y. N., Chen J., Li X. L. (2009). Spectral entropy: a complementary index for rolling element bearing performance degradation assessment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 223(5), 1223–1231.
- QGIS (2020). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org/it/site/> (accessed October 30, 2020)
- Sharma V., Parey A. (2016). A review of gear fault diagnosis using various condition indicators. *Procedia Engineering*, 144, 253–263.
- Shen J., Hung J., Lee L. (1998). Robust entropy-based endpoint detection for speech recognition in noisy environments. *Fifth International Conference on Spoken Language Processing*.
- Talledo D., Miano A., Bonano M., Di Carlo F., Lanari R., Meda A., Mele A., Prota A., Saetta A., Stella A., *Satellite Radar Interferometry: potentiality and limitations for structural assessment and monitoring*, submitted 2021
- TRE website (2020), <https://site.tre-altamira.com/insar/> (accessed October 30, 2020)

- Vakkuri A., Yli-Hankala A., Talja P., Mustola S., Tolvanen-Laakso H., Sampson T., Viertiö-Oja, H. (2004). Time-frequency balanced spectral entropy as a measure of anesthetic drug effect in central nervous system during sevoflurane, propofol, and thiopental anesthesia. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, 48(2), 145–153.
- Wackernagel H. (2003). *Multivariate geostatistics. An introduction with applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-44142-7
- West B. M., Locke W. R. Andrews T. C., Scheinker A., Farrar C. R. (2019). Applying Concepts of Complexity to Structural Health Monitoring. In: Niezrecki C., Baqersad J. (eds). *Structural Health Monitoring, Photogrammetry & DIC*. Volume 6, 205–215. Springer International Publishing.
- Zhu M., Wan X., Fei B., Qiao Z., Ge C., Minati F., Costantini M. (2018). Detection of Building and Infrastructure Instabilities by Automatic Spatiotemporal Analysis of Satellite SAR Interferometry Measurements. *Remote Sensing*, 10, 1816.

BOZZA

4 INTERPRETAZIONE DEL COMPORTAMENTO STRUTTURALE ATTRAVERSO L'UTILIZZO DEI DATI SATELLITARI

4.1 PREMESSA

Il tema dell'interpretazione del comportamento strutturale, a valle dell'elaborazione dei dati satellitari condotta come descritto nel precedente capitolo, è di fondamentale importanza, anche in relazione alle tipologie di azioni i cui effetti sulle strutture sono effettivamente monitorabili con le tecniche interferometriche. A questo riguardo, il presente capitolo dettaglia le possibili diverse tipologie di azioni, individuando quelle i cui effetti sulle strutture possono efficacemente essere monitorati attraverso l'utilizzo dei dati satellitari. È infatti evidente che i dati satellitari, la cui frequenza dipende dal passaggio del satellite sull'area di interesse e varia da pochi giorni a qualche settimana (si veda anche paragrafo 1.1), forniscono buoni risultati nel caso dell'osservazione di fenomeni in lenta evoluzione, mentre risultano ad oggi meno efficaci per la valutazione di fenomeni la cui evoluzione può avere una breve durata.

Nel corso della propria vita utile, le costruzioni interagiscono innanzitutto con il contesto geologico ed ambientale nel quale sono realizzate. Le costruzioni sono pertanto soggette non solo alle azioni come classificate nei capitoli 2 e 3 delle Norme Tecniche delle Costruzioni 2018 (NTC 2018), ma anche ad ulteriori azioni indotte sulla struttura da fenomeni ambientali, meteorologici e di instabilità del sottosuolo, indipendenti dalla presenza della struttura stessa e che comunque possono generare spostamenti nella struttura rilevabili anche con la tecnica interferometrica. Pertanto, al fine di ottenere una visione d'insieme delle azioni che possono determinare movimenti monitorabili attraverso interferometria satellitare, è importante conoscere da un lato le caratteristiche della struttura, e dall'altro anche il contesto geologico del sottosuolo ed il contesto ambientale nel quale è inserita la costruzione stessa.

Infine, è evidente che la fase di interpretazione del comportamento strutturale attraverso l'analisi di dati satellitari è una attività complessa in quanto se condotta in modo non corretto o anche con riferimento ad un orizzonte temporale non idoneo, potrebbe portare ad errate valutazioni del comportamento strutturale. Per tale motivo, nell'ultima parte del capitolo vengono discussi in dettaglio i limiti e le potenzialità insite nella suddetta fase di interpretazione del comportamento strutturale, che integrano quanto già riportato nel Paragrafo 3.7 in merito ai potenziali limiti della fase di interpretazione dei dati stessi.

4.2 AZIONI E LORO EFFETTI SULLE COSTRUZIONI

Si riporta di seguito una schematica classificazione delle azioni che possono determinare spostamenti (verticali/subverticali o orizzontali) nelle costruzioni civili inclusi gli edifici ordinari, strategici e a carattere monumentale (Augenti, 2009). Le azioni possono essere di varia natura, ovvero determinate da cause naturali, antropiche, o loro combinazione, ed interessare diversi ambiti spaziali passando da una scala territoriale a quella della singola costruzione.

4.2.1 Azioni legate all'interazione "attiva" terreno-struttura

Il sistema fondale di una costruzione interagisce inevitabilmente con il sottosuolo, e le azioni conseguenti possono essere suddivise in diverse categorie.

Una prima categoria è relativa al cedimento della fondazione, ovvero l'abbassamento verticale, assoluto o relativo, del piano di posa della fondazione di una struttura (o di una parte di essa) a causa del cedimento del terreno sottostante per effetto dei carichi verticali agenti sulla struttura stessa (Figura 4.1). L'abbassamento della fondazione è l'integrale del cedimento dei diversi strati di terreno indotto proprio dal carico della sovrastruttura trasferito ai diversi strati del sottosuolo attraverso la fondazione. Il cedimento al di sotto di una costruzione può non essere uniforme, ed in questo caso i cedimenti differenziali indotti sulla costruzione possono condurre a danneggiamenti della costruzione stessa nel caso in cui quest'ultima sia particolarmente rigida (ad esempio una costruzione in muratura), o a cinematismi di roto-traslazione rigida della struttura che

possono portare al dissesto dell'opera ponendo problemi sia di utilizzo che, nei casi più gravi, anche di sicurezza (Burland e Wroth, 1975).

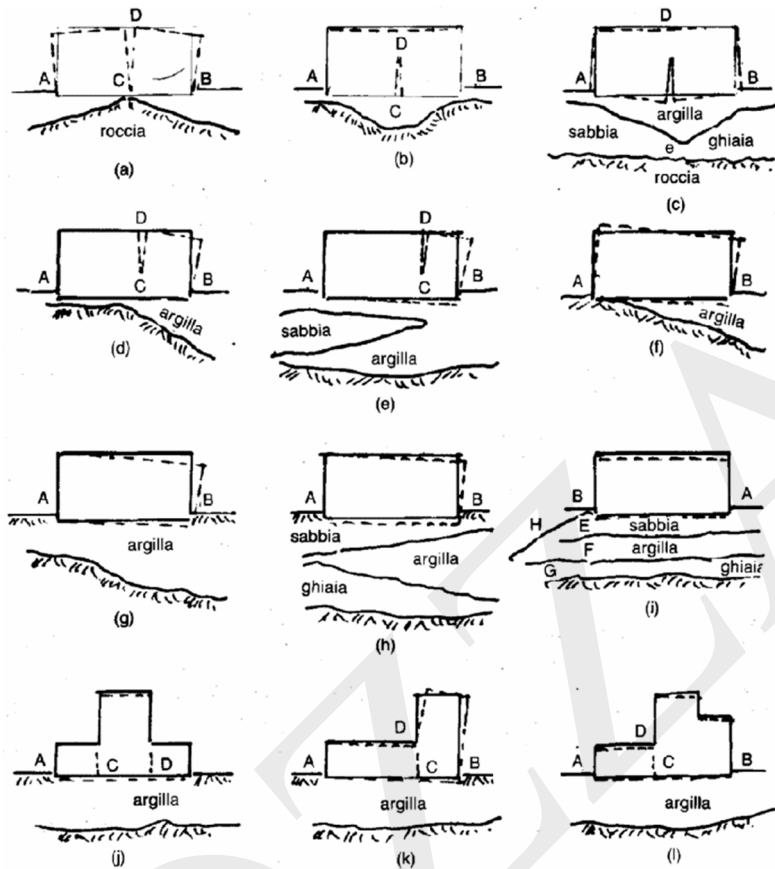
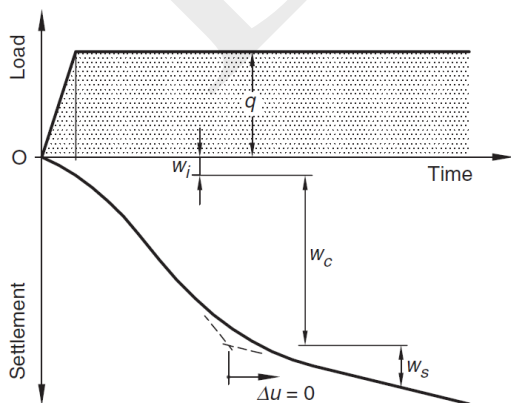
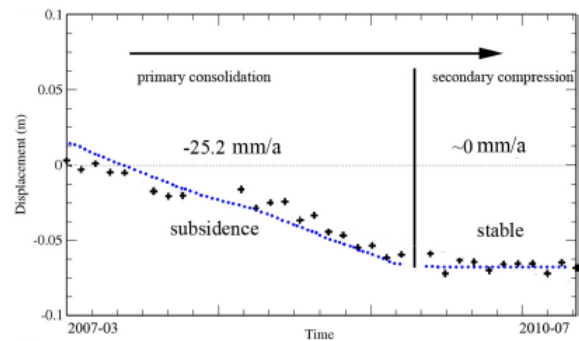


Figura 4.1 – Esempi di cedimenti non uniformi cui può essere soggetta una struttura (Bowles, 1991).

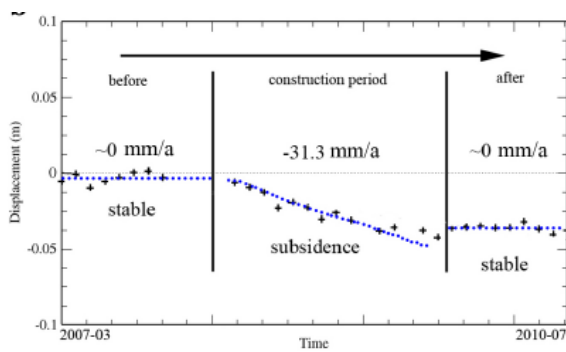
Il cedimento del sottosuolo può essere distinto in una componente di consolidazione primaria ed in una componente secondaria (Terzaghi e Peck, 1967). La durata del processo di consolidazione primaria dipende da numerosi fattori e può portare a cedimenti dell'ordine dei centimetri nell'arco temporale di diversi anni (Figura 4.2a), mentre la componente secondaria che dipende dalle successive deformazioni viscoso dello scheletro solido, usualmente comportano cedimenti di minore entità. Nel caso di costruzioni di recente realizzazione, qualora l'entità dei cedimenti sia dell'ordine centimetrico, tale processo di abbassamento tempo-dipendente è apprezzabile anche attraverso *time series* di monitoraggio interferometrico (Figura 4.2b, c, d).



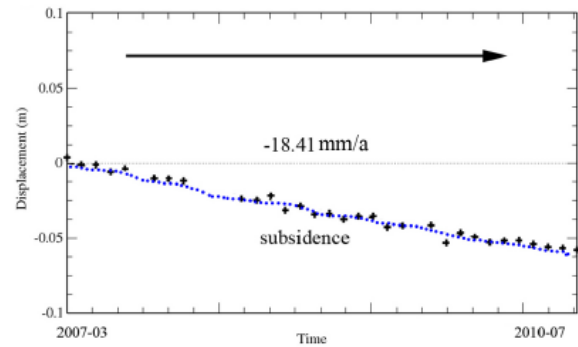
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.2 – (a) Evoluzione dei cedimenti da consolidazione nel tempo (Lancellotta, 2009). Esempi di utilizzo dei dati interferometrici satellitari per l'individuazione di (b) effetti della consolidazione primaria e secondaria, (c) cedimenti del terreno in fase di realizzazione di un'opera, e (d) cedimenti del terreno legati ad altri fattori, quali subsidenza (confronta paragrafo 4.2.2) (Chen et al., 2012).

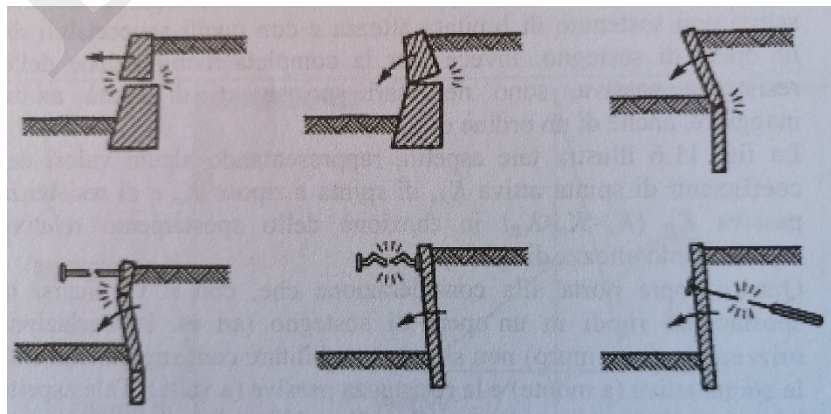
Limitandosi ai cedimenti causati dal peso della sovrastruttura che insiste sul terreno fondale, eccessivi cedimenti possono essere causati da:

- eccessivo carico trasmesso dalla struttura o variazione del carico della struttura non adeguatamente mitigato;
- mancato consolidamento del piano di posa;
- inadeguato dimensionamento della fondazione o delle proprietà meccaniche della fondazione;
- infiltrazioni di acque propagatesi nel piano di posa (cfr. paragrafo 4.2.3).

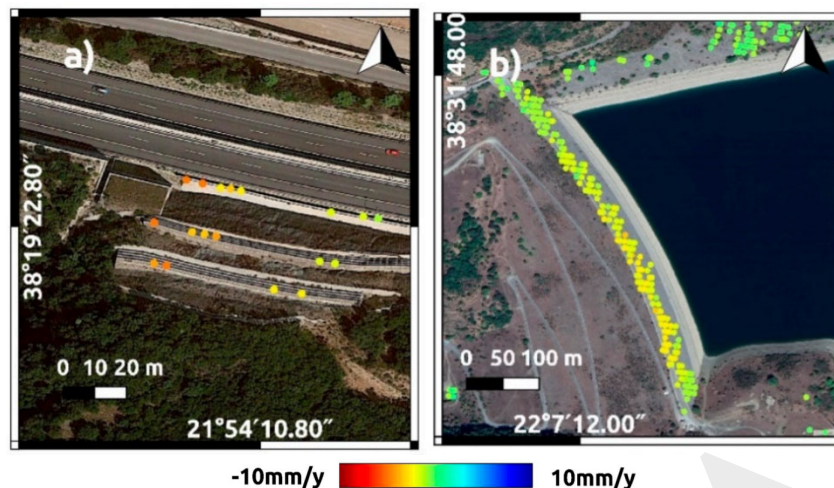
Alcune delle cause sopra elencate possono portare ad una capacità portante non adeguata del sistema terreno - fondazione con conseguente dissesto del sistema fondale e con l'insorgenza di danni più o meno importanti alla struttura sovrastante. Il monitoraggio attraverso interferometria satellitare può essere di ausilio nell'individuazione di tale negativa contingenza, in quanto consente di rilevare l'andamento nel tempo degli spostamenti della sovrastruttura, e pertanto l'insorgenza di trend anomali nel tempo (e.g., Bozzano et al., 2018; Chen et al., 2012; Stramondo et al., 2008), si veda anche Figura 4.2.

Una seconda categoria di problemi di interazioni terreno-struttura riguarda l'esecuzione di scavi e sbancamenti. Infatti, la rimozione di terreno può produrre una drastica riduzione del carico limite, ancor più se lo scavo è approfondito ad una quota inferiore a quella del piano di posa della fondazione.

Infine, una terza categoria riguarda le sovraspinte indotte dal terreno sulle fondazioni o loro parti, oppure sulle opere di contenimento che possono attivare spinte impreviste tali da causare il ribaltamento delle strutture (Figura 4.3). Anche in questo caso, gli spostamenti del terreno ed i conseguenti effetti sulle strutture sono di dimensione centimetrica, e possono essere rilevati mediante le tecniche interferometriche.



(a)



(b)

Figura 4.3 – (a) Esempi di collasso di muri di sostegno e paratie (Berardi, 2013). (b) Esempi di utilizzo delle tecniche interferometriche satellitari per il monitoraggio di opere di sostegno viarie e dighe (Papoutsis et al., 2020).

4.2.2 Azioni indotte da movimenti del sottosuolo indipendenti dalla costruzione

I processi geologici che avvengono nel sottosuolo possono interagire con le costruzioni soprastanti, determinando azioni di vario genere che si ripercuotono passivamente sulle strutture di fondazione determinando spostamenti della sovrastruttura, anche rilevabili, e potenziali danno nel caso di spostamenti differenziali significativi.

Tali azioni possono interessare estese porzioni di territorio, coinvolgendo anche le strutture e infrastrutture che gravitano su di esse, oppure possono riguardare aree circoscritte e quindi anche una singola costruzione o un aggregato.

Parallelamente a questa distinzione spaziale, i fenomeni che avvengono nel sottosuolo possono essere classificati in processi generati da cause naturali e processi generati da cause antropiche. Talvolta, il medesimo fenomeno può essere generato e/o amplificato dalla combinazione di fattori naturali e antropici.

Nel seguito sono brevemente descritti alcuni processi, prevalentemente naturali ma anche indotti da attività antropiche, che possono interagire, attraverso le fondazioni, con le (sovra)strutture: *i*) i movimenti verticali di abbassamento e sollevamento della superficie topografica (subsidenza), *ii*) le frane, e *iii*) gli effetti sismici secondari quali frane, liquefazione ed addensamento dei terreni.

Subsidenza

I movimenti di abbassamento verticale della superficie topografica vengono genericamente indicati con il termine *subsidenza* (Figura 4.4), indipendentemente dalla causa, dal suo sviluppo spaziale ed evoluzione temporale, dalla velocità di spostamento e dalle alterazioni ambientali che ne conseguono (<https://www.isprambiente.gov.it>). Questo processo può coinvolgere territori di estensione variabile, anche molto vasti, ed è causato da fattori naturali quali principalmente la compattazione di sedimenti per effetto di carichi litostatici (e.g., D'Amico et al., 2020; Del Ventisette et al., 2015), gli abbassamenti del livello di falda nel sottosuolo (e.g., Botey e Bassols et al., 2021; Bozzano et al., 2015; Galloway e Burbey, 2011) e, secondariamente, da fenomeni a più ampia scala quali quelli relativi ad esempio alla dinamica dei sistemi vulcanici (e.g., D'Auria et al., 2015) ed alla tettonica (e.g., Baldi et al., 2009). Per quanto attiene agli spostamenti della superficie topografica legati all'evoluzione tettonica di un'area, questi possono avere componente prevalentemente verticale, oppure orizzontale, la possibilità di essere rilevati attraverso interferometria satellitare dipende anche dalla entità di spostamento e/o dalla velocità con cui essi avvengono che devono superare le soglie di rilevabilità (cfr. capitolo 2 di questo volume).

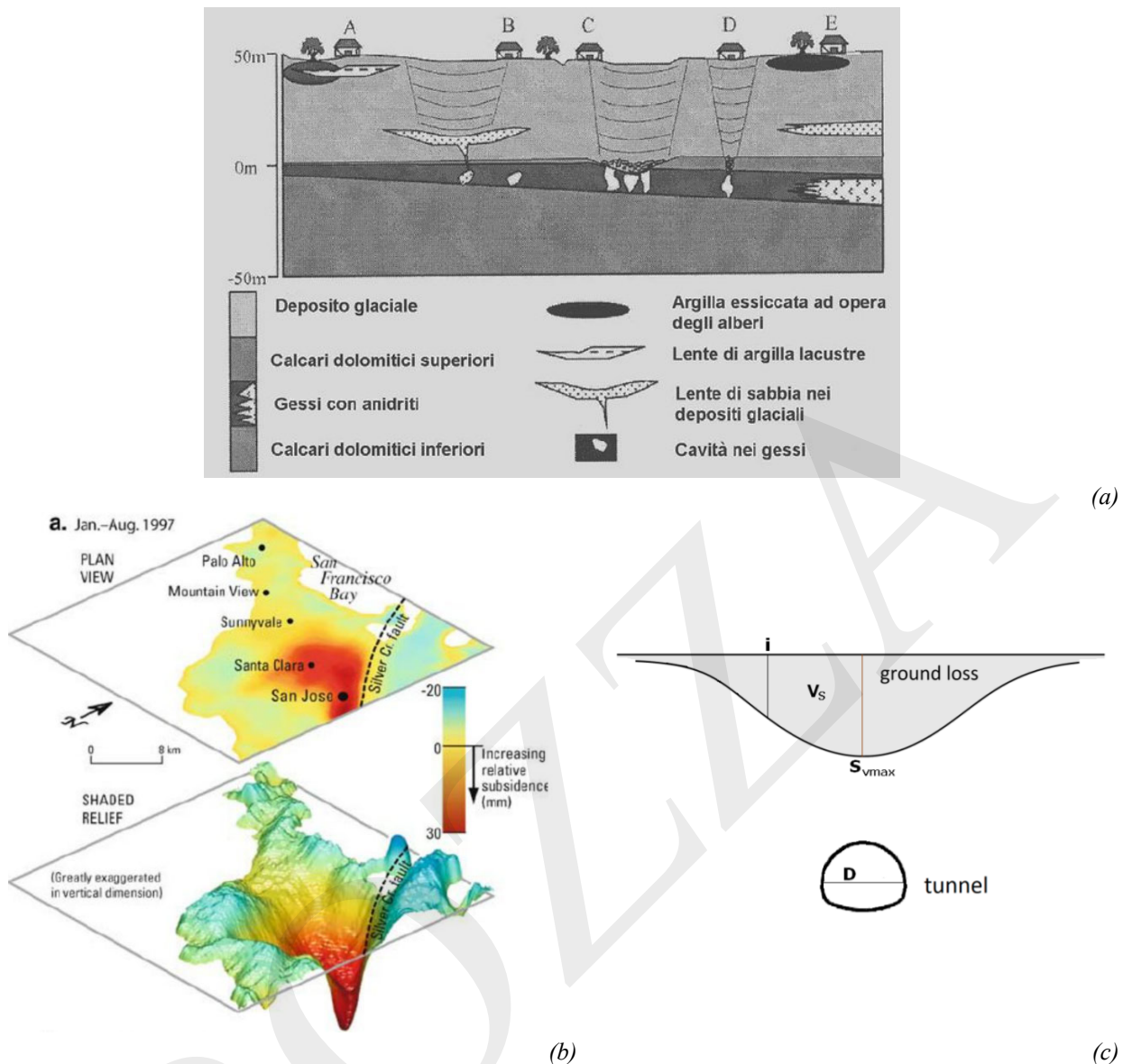
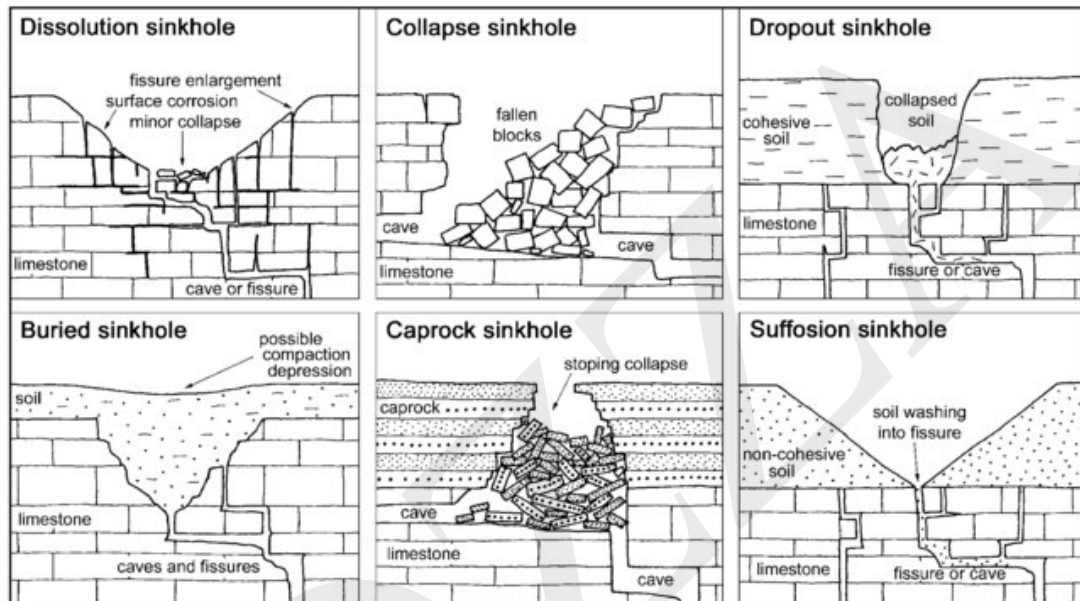


Figura 4.4 – (a) Schema concettuale di meccanismi di subsidenza in gessi (Lamont-Black et al., 2002). (b) Mappa di cedimenti dovuti alla subsidenza ottenibile da dati interferometrici satellitari (Galloway and Hoffmann, 2007). (c) Schema di deformazione del piano campagna dovuta alla realizzazione di uno scavo (Kontogianni e Stiros, 2020).

La subsidenza può essere ulteriormente aggravata o innescata da azioni antropiche quali l'eccessivo sfruttamento nel sottosuolo di falde acquifere (e.g., de Wit et al., 2021; Herrera et al., 2009; Tosi et al., 2013), l'estrazione di idrocarburi (e.g., Manzella et al., 2018), oppure l'estensiva urbanizzazione e industrializzazione di un'area suscettibile (e.g., Rosi et al., 2016; Solari et al., 2016; Tosi et al., 2002). In ambito urbano, la subsidenza può essere causata anche dalla costruzione di gallerie, superficiali o poco profonde (e.g., Antonielli et al., 2021; Kontogianni e Stiros, 2020; Milillo et al., 2018; Scoular et al., 2020).

In taluni contesti, si assiste all'alternarsi nel tempo di movimenti di abbassamento e sollevamento della superficie topografica indotti ad esempio da oscillazioni cicliche dei livelli piezometrici per cause naturali (oscillazioni stagionali delle pressioni dell'acqua) (e.g., Ferrario et al., 2015; Nappo et al., 2020), cicli di imbibizione ed essiccamento di terreni superficiali con elevato contenuto di minerali espandibili (Meisina et al., 2006), oppure ancora quelli causati da sistemi vulcanici in evoluzione quali il ben noto fenomeno vulcanico del bradisismo dei Campi Flegrei (e.g., Avallone et al., 1999; D'Auria et al., 2015; Lanari et al., 2004; Troise et al., 2018), oppure ancora quelli indotti da cicli ripetuti di iniezione di gas nel sottosuolo (Rucci et al., 2013).

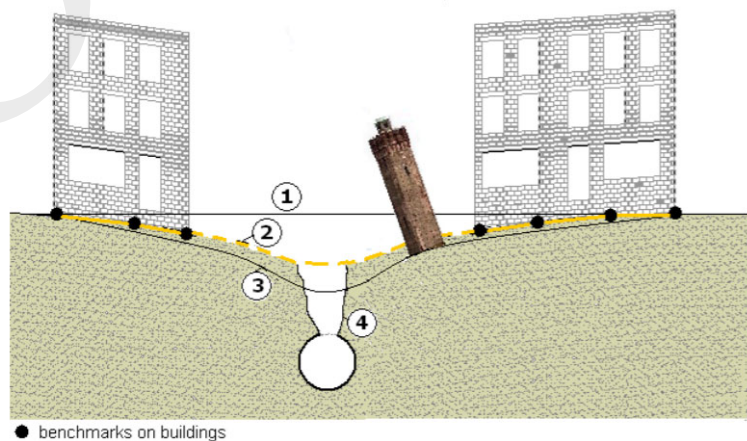
La subsidenza di settori di estensione relativamente limitata può essere segno “premonitore” di fenomeni di collasso repentini del sottosuolo noti con il termine *sinkholes* (Figura 4.5). Trattasi di sprofondamenti rapidi del terreno sotto forma di depressioni circolari, causati principalmente dal crollo di cavità carsiche sotterranee (<https://ingvambiente.com>). La presenza di un substrato di rocce solubili coperto da depositi alluvionali con basse proprietà geomeccaniche costituisce il fattore naturale predisponente questo tipo di collasso (e.g., Galve et al., 2015; Waltham e Fookes, 2003): *Sinkholes* possono anche verificarsi a causa del collasso di cavità realizzate dall'uomo, fenomeni accaduti sia in antichità sia in tempi più recenti anche in ambito urbano (cave in sotterraneo, depositi, acquedotti, fognature, drenaggi ecc.) (e.g., Kontogianni e Stiros, 2020; Orhan et al., 2021; Theron e Engelbrecht, 2018).



(a)



(b)

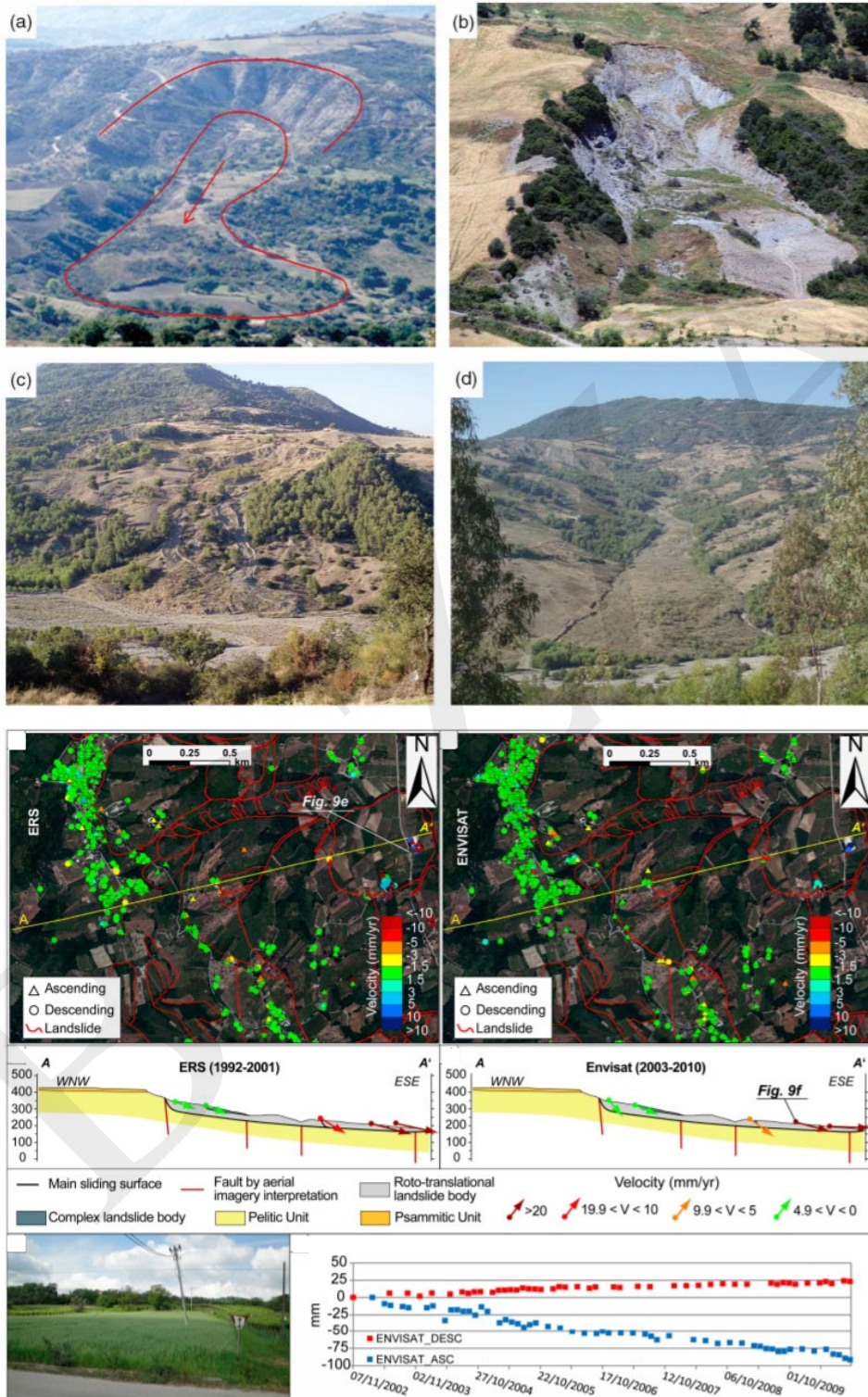


(c)

Figura 4.5 – (a) Classificazione dei sinkholes rispetto al meccanismo di collasso del terreno e alla natura del materiale coinvolto (Waltham e Fookes, 2003). (b) Esempi di sinkholes in ambito urbano e rurale (Kontogianni e Stiros, 2020; Orhan et al., 2021). (c) Deformazione del piano campagna e collasso a seguito della costruzione di una galleria in ambito urbano (Kontogianni e Stiros, 2020).

Frane

Le frane producono il movimento lungo un versante di una massa di roccia, terra oppure detrito (Figura 4.6) secondo cinematismi che possono essere classificati in modo diverso (Cruden e Varnes, 1996; Hungr et al., 2014).



(e) *Figura 4.6 – (a)-(d) Esempi di frane: movimenti complessi, scivolamento rotazionale, colata detritica e colamento (Conforti et al., 2014). (e) Esempio di rilievo degli spostamenti di frane attraverso l'uso di dati interferometrici satellitari (Bozzano et al., 2017).*

L'attivazione o riattivazione di una frana, per cause naturali e/o antropiche, può causare spostamenti con componenti verticale ed orizzontale delle costruzioni che gravitano sull'area coinvolta dal movimento gravitativo. Tali spostamenti sono rilevabili anche attraverso monitoraggio interferometrico, principalmente quelli correlati ad alcune tipologie di frana quali ad esempio scivolamenti rotazionali e traslazionali, colamenti e movimenti complessi relativamente lenti (e.g., Bovenga et al., 2012; Bozzano et al., 2017; 2020; Calvello et al., 2017; Del Ventisette et al., 2014; Miano et al., 2021; Moretto et al., 2017; Nappo et al., 2019; Raspini et al., 2017; Solari et al., 2020).

Effetti sismici secondari

In occasione di eventi sismici, è possibile osservare spostamenti indotti da effetti secondari del sisma sul sottosuolo, quali frane, liquefazione ed addensamento dei terreni. Tali spostamenti possono avere evidentemente effetti su costruzioni che insistono sulle aree coinvolte da questi fenomeni. Questi spostamenti sono considerati effetti secondari del sisma in quanto non dipendono dallo scuotimento indotto sulla costruzione dal sisma, ma da processi indotti sui terreni dallo scuotimento stesso (Fan et al., 2019). In particolare, tali fenomeni possono essere frane indotte dal sisma sui versanti, la liquefazione di terreni granulari fini che possono causare instabilità delle fondazioni delle costruzioni fino al collasso, o addensamento di terreni granulari sciolti che si può tradurre in un abbassamento del piano fondale e di eventuale fagliazione superficiale.

4.2.3 Azioni delle acque

Le conseguenze indotte dalle azioni delle acque possono manifestarsi in maniera differente a seconda dell'origine delle acque, della loro quantità e degli effetti che esse producono sulle strutture investite (Augenti, 2009 e 2012).

Analogamente al caso precedente, le acque possono provocare azioni a scala territoriale o azioni dirette sulle costruzioni. Per quanto riguarda gli effetti su larga scala, si è già accennato in precedenza come azioni antropiche, quali il prelievo di acque dal sottosuolo, possano indurre fenomeni di subsidenza di un territorio. Le acque dei corsi fluviali possono causare fenomeni di scalzamento delle fondazioni di pile da ponte, più o meno accentuati, o di spostamento delle spalle degli stessi. Tali fenomeni possono essere improvvisi, e causare crolli di ponti durante eventi di piena, anche senza segni premonitori, oppure di più lunga durata quando, ad esempio nel caso di pile in alveo fluviale, l'erosione avviene gradualmente sotto la fondazione della pila. In questo secondo caso, dati da interferometria satellitare possono essere in grado di registrare movimenti della sovrastruttura del ponte in direzione verticale (cedimenti) oppure orizzontale (conseguenti a rotazioni della pila).

Per quanto riguarda invece le azioni alla scala dell'edificio, una prima categoria di azioni che può avere effetti sugli edifici è costituita dalle infiltrazioni. Indipendentemente dalla loro natura (reti di irrigazione o antincendio, reti fognarie per la raccolta e lo smaltimento delle acque reflue bianche e nere), ai soli fini della indicazione dei possibili effetti e dunque dei dissesti che possono indurre sugli edifici, la discriminante essenziale è costituita dal fatto che le acque risultino in pressione o meno. La differenza è sostanziale perché l'acqua in pressione (acque potabili o antincendio) si diffonde rapidamente (in poche ore o pochi giorni) nel terreno con effetti erosivi e demolitivi, producendo cavità anche di grandi dimensioni. Un ruolo fondamentale per il propagarsi dell'evento e delle sue conseguenze è costituito dalla natura e caratteristiche del sottosuolo e dall'esistenza di "recapiti" nei quali possano essere trasportati i materiali sciolti. Le acque possono pervenire da fratture presenti nel materiale costituente la tubazione idrica sottostante la pavimentazione stradale o dai giunti di estremità, oppure dal collettore fognario eventualmente danneggiato, oppure possono avere origine dal sovraccarico idraulico conseguente ad abbondanti piogge. Ad esempio, nel caso dei collettori antichi in centri storici, dimensionati per portate nettamente inferiori a quelle attuali, i manufatti possono andare "in pressione" e danneggiarsi, riversando le acque nel terreno circostante. I sintomi e gli effetti dei cedimenti differiscono al variare della tipologia di fondazione e della tecnologia di costruzione.

Le infiltrazioni possono derivare anche da precipitazioni meteoriche, come i nubifragi. Le acque meteoriche possono infiltrarsi nel sottosuolo:

- attraverso le sconessioni della pavimentazione stradale per effetto dell'occlusione delle caditoie;
- attraverso convogliamento diretto delle caditoie pluviali nel sottosuolo, per mancanza di recapito nel collettore fognario comunale.

Una seconda categoria è costituita dagli allagamenti, intesi come infiltrazioni che assumono dimensione macroscopica, ovvero fuoriuscite d'acqua che diventano consistenti per volume e diffusione, i cui effetti possono essere del tutto diversi. In tal caso i cedimenti possono assumere dimensioni tali da coinvolgere intere costruzioni, ma l'azione delle acque può produrre anche effetti demolitori con conseguenze difficilmente prevedibili. Spesso tali fenomeni si manifestano attraverso la comparsa di voragini che rappresentano solamente la parte visibile del processo, che risulta però di ridotta entità rispetto al suo complesso. Indagini più approfondite evidenziano, quasi sempre, l'esistenza di vere e proprie caverne di grande ampiezza, articolazione e diffusione. Una caratteristica precipua di tali fenomeni è, infatti, quella di produrre effetti dannosi anche a notevole distanza dalla sorgente, in dipendenza dei percorsi preferenziali trovati dall'acqua nel suo defluire verso vie di minore resistenza.

Anche in questo caso, i fenomeni descritti sono associati ad uno stato deformativo che si sviluppa alla scala dell'edificio e che potrebbe essere rilevato tramite lo strumento dei dati satellitari.

4.2.4 Azione sismica

Le azioni sismiche sono originate da assestamenti della crosta terrestre, provocati dallo spostamento improvviso di masse rocciose nel sottosuolo. Tale spostamento è generato dalle forze di natura tettonica che agiscono costantemente all'interno della crosta terrestre provocando una lenta deformazione fino al raggiungimento del carico di rottura con conseguente liberazione di energia elastica in una zona interna della Terra detta ipocentro, tipicamente localizzato in corrispondenza di fratture preesistenti della crosta (faglie).

I sismi provocano accelerazioni a livello del suolo che causano danni alle strutture, e spostamenti residui della superficie terrestre dopo il sisma, detti spostamenti cosismici (ovvero, la deformazione istantanea e permanente causata dal terremoto), spesso dell'ordine di decine di cm in direzione verticale ed orizzontale. Le deformazioni cosismiche associate ad un terremoto sono rilevabili attraverso un interferogramma ottenuto confrontando due immagini rispettivamente pre e post sisma come già ben esemplificato alla Figura 2.18 di questo volume per il terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009. Gli spostamenti "asismici" lungo faglie possono essere esaminati attraverso serie temporali di spostamento ricostruite con tecniche di interferometria SAR multitemporale (Cetin et al., 2014).

A spostamenti residui elevati corrisponde un effetto significativo dell'azione sismica e potenziali danni alle strutture, ma non sono un segnale diretto di danneggiamento in quanto non indicano necessariamente l'occorrenza di spostamenti differenziali sulle strutture. Chiaramente è possibile determinare, sempre utilizzando la stessa tecnica, l'occorrenza di spostamenti su specifiche strutture, ma la determinazione di spostamenti differenziali di punti di una struttura può essere difficoltosa in quanto di 1-2 di grandezza inferiori rispetto allo spostamento cosismico.

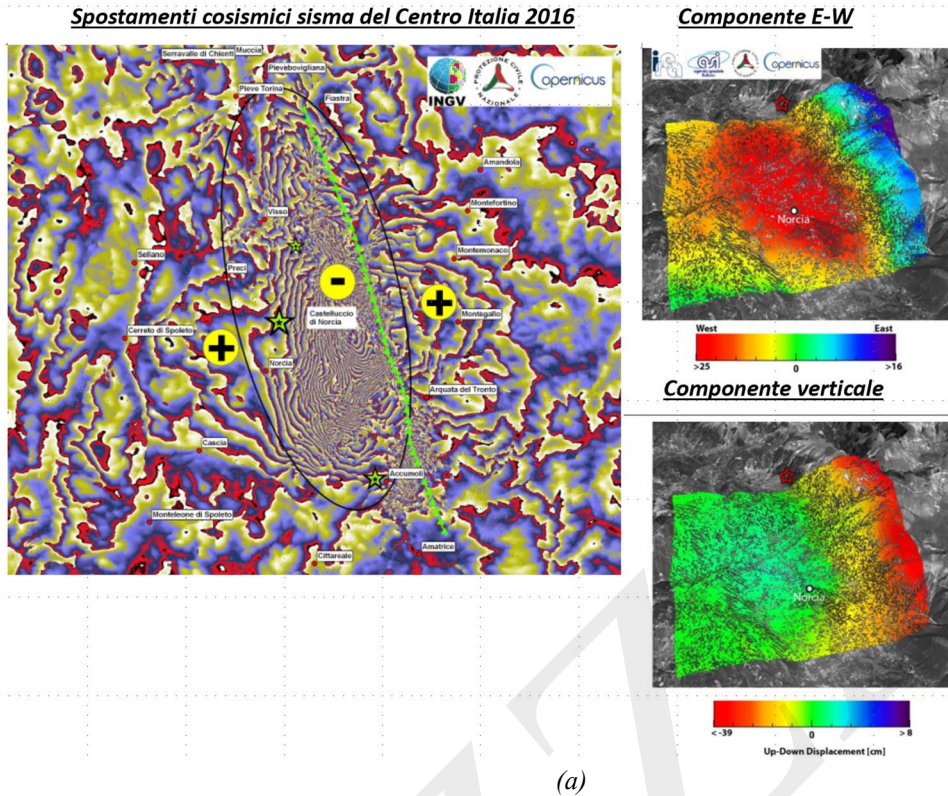


Figura 4.7 – Spostamenti cosismici ottenuti attraverso l'elaborazione dei dati della costellazione satellitare Sentinel-1 relativi all'evento del centro Italia del 2016. (a) Interferogramma differenziale, ogni frangia rappresenta uno spostamento di circa 3 cm (+ indica avvicinamento al sensore lungo la LOS, - allontanamento dal sensore lungo la LOS). (b) mappe delle componenti E-W (in alto) e verticale in basso dello spostamento cosismico

4.2.5 Altre azioni sulle strutture

Di grande rilevanza, nel contesto delle presenti Linee Guida, è determinare quali effetti delle azioni sulle costruzioni possono essere rilevati con le tecniche dell'interferometria satellitare. Come ampiamente discusso in precedenza, possono essere determinati spostamenti conseguenti ad azioni improvvise (siano esse ad esempio cedimenti del sottosuolo, effetti di piene fluviali, azioni sismiche, azioni eccezionali in genere) mediante interferogrammi ottenuti confrontando due immagini prima e dopo l'evento, purché abbiano una dinamica spaziale e temporale tale da risolvere l'ambiguità di fase attraverso le tecniche di *Phase Unwrapping* (si veda paragrafo 2.4). Tuttavia, di maggiore interesse al fine delle presenti Linee Guida è la capacità di queste tecniche di rilevare spostamenti differenziali variabili nel tempo sulle strutture, al fine di divenire un effettivo supporto al monitoraggio strutturale.

A tale riguardo, è necessario innanzitutto distinguere spostamenti sulle strutture che conseguono al normale comportamento elastico delle stesse dagli spostamenti che invece possono indicare la possibile insorgenza di un danno.

Tra gli spostamenti che conseguono al normale comportamento delle strutture, si annoverano:

Spostamenti derivanti dal comportamento elastico

Gli spostamenti elastici sono trascurabili in genere negli edifici, ma possono essere invece significativi per strutture da ponte particolarmente flessibili, in particolare in corrispondenza degli impalcati, che possono essere soggetti a spostamenti assoluti di ampiezza fino a qualche cm al passaggio di traffico pesante o per l'azione del vento. In questi casi, poiché l'immagine satellitare è colta nel preciso istante del passaggio del satellite, ma non sono noti il tipo di carichi agenti in quel preciso istante e la loro entità, lo spostamento dei *Persistent Scatterers* da un transito del satellite a quello successivo è difficilmente utilizzabile ai fini

dell'individuazione di eventuali anomalie di comportamento. Nel caso in cui tali spostamenti siano significativi, essi possono inoltre portare alla perdita di coerenza tra le varie immagini radar e quindi addirittura alla perdita del dato.

Spostamenti derivanti da deformazioni termiche

Le variazioni termiche possono indurre, per certe strutture, deformazioni che fanno parte del normale comportamento delle strutture e quindi non indicano l'insorgenza di danneggiamenti. Tali deformazioni sono tipicamente ad andamento ciclico, ad intervallo stagionale o anche giornaliero. Sono particolarmente soggette a deformazioni termiche le strutture in acciaio (per le quali ad esempio si possono rilevare deformazioni cicliche in direzione verticale), ma anche strutture molto snelle quali ad esempio le torri storiche in muratura, la cui deformazione relativa di una parete rispetto alle altre per effetto del riscaldamento può provocare spostamenti orizzontali della sommità con andamento ciclico, fino a dare origine ad una vera e propria "rotazione" della torre stessa.

Fenomeni lenti: ritiro e fenomeni viscosi

Alcuni tipi di materiali sono soggetti a deformazioni lente nel tempo, di tipo anelastico, quali il ritiro (deformazione in assenza di carico) o le deformazioni viscosi (in presenza di carico). Ciò accade in particolare per le strutture in calcestruzzo armato e le strutture in legno. Gli effetti delle deformazioni lente sono più rilevanti nelle strutture snelle, ad esempio le coperture o gli impalcati da ponte, per le quali una deformazione lenta differenziale sulle due facce (ad esempio intradosso ed estradosso) può causare una inflessione dell'elemento stesso, che può essere dell'ordine di cm.

Chiaramente, rivestono maggiore interesse nel monitoraggio delle strutture i movimenti al contrario conseguenti a un malfunzionamento delle strutture stesse, che pertanto possono essere un segnale premonitore dell'insorgenza di un danneggiamento. A tale scopo, è chiaramente necessario riuscire a distinguere, in una serie temporale, il contributo elastico derivante dai fenomeni sopra citati da quello potenzialmente anelastico indice di danno, e ciò può essere fatto unicamente, allo stato attuale, esaminando serie temporali di una certa lunghezza e disponendo, possibilmente, anche di dati on site (quali la temperatura in corrispondenza dell'opera). Per tutti questi motivi, allo stato attuale l'analisi interferometrica di dati satellitari può essere un importante ausilio per il monitoraggio delle strutture (consentendo anche di analizzare dati indietro nel tempo), evidenziando potenziali situazioni di attenzione, ma non può da sola rappresentare un sistema di *early warning* per la gestione della sicurezza attiva di un'opera, sia essa un edificio o una infrastruttura.

4.3 IL SUPPORTO DELLA RICOSTRUZIONE DELL'ASSETTO GEOLOGICO DEL SOTTOSUOLO PER L'UTILIZZO DEI DATI SATELLITARI

In corso di stesura

4.4 CRITICITÀ NELLA FASE DI INTERPRETAZIONE DEI DATI SATELLITARI

In questo paragrafo vengono sinteticamente descritte alcune criticità che possono emergere durante l'utilizzo dei dati interferometrici satellitari ai fini dell'interpretazione del comportamento strutturale delle costruzioni. In particolare, si farà riferimento a possibili criticità comuni a tutte le tipologie strutturali, mentre criticità nel caso di specifiche tipologie di strutture (edifici in muratura e calcestruzzo armato, infrastrutture, opere monumentali ed aree archeologiche) saranno trattate nei relativi capitoli.

Un primo aspetto da evidenziare, in termini di interpretazione del comportamento strutturale, riguarda la selezione dei punti di misura (*Persistent Scatterers* - PSs) da considerare in funzione delle analisi da svolgere (analisi a larga scala o alla scala dell'edificio, si veda anche paragrafo 3.4). L'utilizzo di tutti i punti a disposizione può, infatti, non essere sempre la scelta più opportuna, ma deve essere valutato caso per caso, a seconda del grado di correlazione spaziale dei fenomeni deformativi a livello di terreno e di costruzione (si

pensi ad esempio agli spostamenti dell'impalcato di un ponte, non necessariamente correlati a quelli del terreno sottostante).

Partendo dalla considerazione generale che conviene sempre utilizzare il maggior numero di PSs possibile al fine di minimizzare le incertezze legate alla singola lettura, è necessario riflettere sulla differente interpretazione, qualora si usino singoli PSs, rispetto all'adozione di tecniche di interpolazione che includano un numero superiore di punti di misura. In relazione a questo ultimo aspetto, è necessario avere ben chiare le condizioni di applicabilità delle diverse tecniche di ricampionamento spaziale ed i loro limiti, al fine di evitare di incorrere in possibili errate interpretazioni di un fenomeno deformativo (si veda paragrafo 3.3.2 per dettagli). Inoltre, si evidenzia come, per applicare correttamente le tecniche di interpolazione, sia necessario raggiungere un adeguato livello di conoscenza del sistema strutturale in analisi, in modo da evitare di utilizzare dati provenienti da punti appartenenti a porzioni di struttura con differente comportamento (ad esempio, unità strutturali di edifici separate da giunti strutturali o nel caso di ponti con campate aventi comportamento strutturale significativamente differente).

Un ulteriore aspetto di grande rilevanza, che può causare errate interpretazioni dei dati, è legato al fatto che tutte le misure satellitari di spostamento sono di tipo differenziale e quindi sono di fatto misure relative sia nel tempo - rispetto all'istante iniziale - che nello spazio - rispetto al punto di riferimento. Di conseguenza, tutte analisi, o monitoraggio strutturali, basati sugli spostamenti, sono relativi chiaramente al periodo di osservazione e non si riferiscono all'intera storia pregressa dell'edificio. Ad esempio, gli spostamenti cumulati, essendo questi riferiti all'istante iniziale dell'osservazione satellitare, non possono essere direttamente utilizzati come misura dello spostamento effettivo della costruzione, a meno di non integrarli con informazioni di dettaglio sullo stato deformativo della costruzione e del terreno fino all'istante iniziale. Particolare attenzione va posta laddove si vogliono fare previsioni future o analisi retrospettive ed è, quindi, sempre buona norma integrare i dati satellitari con informazioni specifiche ricavabili da campagne di indagini in sito.

Una volta ottenuta con sufficiente affidabilità una stima degli spostamenti della costruzione in esame, è possibile adottare formulazioni empiriche o semi-empiriche per correlare tali spostamenti a specifici potenziali livelli di danno. Inoltre, integrando tali informazioni con le proprietà meccaniche dei materiali attraverso il processo di conoscenza descritto delle norme, è possibile utilizzare la storia di spostamenti come input per valutazioni strutturali di tipo numerico, da eseguirsi, ad esempio, mediante modellazione agli elementi finiti.

4.5 RIFERIMENTI

Antonielli B., Sciortino A., Scancelli S., Bozzano F., Mazzanti P. (2021). Tracking deformation processes at the Legnica Glogow Copper District (Poland) by Satellite InSAR—I: Room and Pillar Mine District. *Land*, 10, 653. <https://doi.org/10.3390/land10060653>

Augenti N. (2009). Crolli e dissesti strutturali: Stato dell'arte e prospettive. Atti del Convegno IF CRASC '09, Napoli, 2-4 Dicembre 2009

Augenti N. (2012). Dissesti dovuti a rotture di reti idriche e fognarie. Atti del Convegno IF CRASC '12, Pisa, 15-17 Novembre 2012.

Avallone A., Zollo A., Briole P., Delacourt C., Beauducel F. (1999). Subsidence of Campi Flegrei (Italy) detected by SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 26, 2303–2306. doi: 10.1029/1999GL900497

Baldi P., Casula G., Cenni N., Loddo F., Pesci, A. (2009). GPS-based monitoring of land subsidence in the Po Plain (Northern Italy). *Earth and Planetary Science Letters*, 288, 204–212. doi: 10.1016/j.epsl.2009.09.023

Berardi R., (2013). *Fondamenti di Geotecnica*. Città Studi Edizioni. De Agostini Scuola SpA – Novara.

Botey i Bassols J., Vázquez-Suñé E., Crosetto M., Barra A., Gerard P., (2021). D-InSAR monitoring of ground deformation related to the dewatering of construction sites. A case study of Glòries Square, Barcelona. *Engineering Geology*, 286, 106041, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106041>.

Bovenga F., Wasowski J., Nitti D.O., Nutricato R., Chiaradia M.T., (2012). Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. *Remote Sensing of Environment*, 119, 272–285. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.013>

- Bozzano F., Carabella C., De Pari P., Discenza M. E., Fantucci R., Mazzanti P., Miccadei E., Rocca A., Romano S., Sciarra N., (2020). Geological and geomorphological analysis of a complex landslides system: the case of San Martino sulla Marruccina (Abruzzo, Central Italy), *Journal of Maps*, 16(2), 126-136, doi: [10.1080/17445647.2019.1702596](https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1702596)
- Bozzano F., Esposito C., Franchi S., Mazzanti P., Perissin D., Rocca A., Romano E. (2015). Understanding the subsidence process of a quaternary plain by combining geological and hydrogeological modelling with satellite InSAR data: The Acque Albule Plain case study. *Remote Sensing of Environment*, 168, 219–238.
- Bozzano F., Esposito C., Mazzanti P., Patti M., Scancella S., (2018). Imaging Multi-Age Construction Settlement Behaviour by Advanced SAR Interferometry. *Remote Sensing*, 10, 1137. doi:10.3390/rs10071137
- Bozzano F., Mazzanti P., Perissin D., Rocca A., De Pari P., Discenza M.E. (2017). Basin Scale Assessment of Landslides Geomorphological Setting by Advanced InSAR Analysis. *Remote Sensing*, 9, 267. <https://doi.org/10.3390/rs9030267>
- Bowles J. E., (1991). *Fondazioni Progetto e Analisi*, McGraw-Hill, Milano. ISBN 8838606226
- Burland J.B., Wroth C.P., (1974). Settlement of buildings and associated damage. *Settlement of Structures. Proceedings of the Conference of the British Geotechnical Society*, 611–764. <https://www.researchgate.net/publication/248646701>.
- Calvello M., Peduto D., Arena L., (2017). Combined use of statistical and DInSAR data analyses to define the state of activity of slow-moving landslides. *Landslides*, 14, 473–489. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0722-6>
- Cetin E., Cakir Z., Meghraoui M., Ergintav S., Akoglu A. M. (2014), Extent and distribution of aseismic slip on the Ismetpas segment of the North Anatolian Fault (Turkey) from Persistent Scatterer InSAR, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 15, 2883–2894, doi:10.1002/2014GC005307.
- Chen F., Lin H., Zhang, Y., Lu Z., (2012). Ground subsidence geo-hazards induced by rapid urbanization: implications from InSAR observation and geological analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 935–942. doi:10.5194/nhess-12-935-2012
- Conforti M., Muto F., Rago V., Critelli S. (2014). Landslide inventory map of north-eastern Calabria (South Italy), *Journal of Maps*, 10(1), 90-102, doi: [10.1080/17445647.2013.852142](https://doi.org/10.1080/17445647.2013.852142)
- Cruden D., Varnes D., (1996). *Landslides: Investigation and Mitigation*. Chapter 3 - Landslide Types and Processes. Transportation Research Board. ISBN 030906208X
- D'Amico F., Gagliardi V., Bianchini Ciampoli L., Tosti F., (2020). Integration of InSAR and GPR techniques for monitoring transition areas in railway bridges. *NDT & E International*, 115, 102291.
- D'Auria L., Pepe S., Castaldo R., Giudicepietro F., Macedonio G., Ricciolino P., Tizzan, P., Casu F., Lanari R., Manzo M., Martini M., Sansosti E., Zinno I., (2015). Magma injection beneath the urban area of Naples: a new mechanism for the 2012–2013 volcanic unrest at Campi Flegrei caldera. *Sci. Rep.* 5, 13100. doi: 10.1038/srep13100
- de Wit K., Lexmond B.R., Stouthamer E., Neussner O., Dörr N., Schenk A., Minderhoud P.S.J., (2021). Identifying Causes of Urban Differential Subsidence in the Vietnamese Mekong Delta by Combining InSAR and Field Observations. *Remote Sensing*, 13, 189. <https://doi.org/10.3390/rs13020189>
- Del Ventisette C., Righini G., Moretti S., Casagli N., (2014). Multitemporal landslides inventory map updating using spaceborne SAR analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30, 238–246. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.02.008>
- Del Ventisette C., Solari L., Raspini F., Ciampalini A., Di Traglia F., Moscatelli M., Pagliaroli A., Moretti S., (2015). Use of PSInSAR data to map highly compressible soil layers. *Geol. Acta*, 13.
- Fan X.M., Scaringi G., Korup O., West A.J., van Westen C.J., Tanyas H., Hovius N., Hales T.C., Jibson R.W., Allstadt K.E., Zhang L.M., Evans S.G., Xu C., Li G., Pei X.J., Xu Q., Huang R.Q. (2019). Earthquake-Induced Chains of Geologic Hazards: Patterns, Mechanisms, and Impacts. *Reviews of Geophysics*, 57, 421-503, ISSN: 8755-1209, doi: 10.1029/2018RG000626
- Ferrario M.F., Bonadeo L., Brunamonte F., Livio F., Martinelli E., Michetti A.M., Censi Neri P., Chiessi V., Comerci V., Höbig N. (2015). Late Quaternary environmental evolution of the Como urban area (Northern

- Italy): A multidisciplinary tool for risk management and urban planning. *Engineering Geology*, 193, 384–401. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.013>
- Galloway D. L., Burbey, T. J. (2011). Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeol. J.* 19, 1459–1486. doi: 10.1007/s10040-011-0775-5
- Galloway D.L., Hoffmann J., (2007). The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 15(2006-11-30). doi: [10.1007/s10040-006-0121-5](https://doi.org/10.1007/s10040-006-0121-5)
- Galve J.P., Castañeda C., Gutiérrez F., Herrera G. (2015). Assessing sinkhole activity in the Ebro Valley mantled evaporite karst using advanced DInSAR. *Geomorphology*, 229, 30-44. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.035>.
- Herrera G., Fernández J.A., Tomás R., Cooksley G., Mulas J., (2009). Advanced interpretation of subsidence in Murcia (SE Spain) using A-DInSAR data - Modelling and validation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 647–661. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-647-2009>
- Hung O., Leroueil S., Picarelli L., (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Kontogianni V., Stiros S.C., (2020). Ground loss and static soil–Structure Interaction during Urban Tunnel Excavation: Evidence from the Excavation of the Athens Metro. *Infrastructures*, 5, 64. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5080064>
- Lamont-Black J., Younger P.L., Forth R.A., Cooper A.H., Bonniface J.P. (2002). A decision-logic framework for investigating subsidence problems potentially attributable to gypsum karstification. *Engineering Geology*, 65, 205–215
- Lanari R., Berardino P., Borgström S., Del Gaudio C., De Martino P., Fornaro G., et al. (2004). The use of IFSAR and classical geodetic techniques for caldera unrest episodes: application to the Campi Flegrei uplift event of 2000. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 133, 247–260. doi: 10.1016/S0377-0273(03)00401-3
- Lancellotta R., (2009). *Geotechnical Engineering*. CRC Press. ISBN 9780415420044.
- Manzella A., Bonciani R., Allansdottir A., Botteghi S., Donato A., Giamberini S., Lenzi A., Paci M., Pellizzone A., Scrocca D., (2018). Environmental and social aspects of geothermal energy in Italy. *Geothermics*, 72, 232–248. doi:10.1016/j.geothermics.2017.11.015
- Meisina C, Zucca F., Fossati D., Cerianic M., Allievi J., (2006). Ground deformation monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: The example of the Oltrepo Pavese. *Engineering Geology*, 88, 240–259
- Miano A., Mele A., Calcaterra D., Di Martire D., Infante D., Prota A., Ramondini M. (2021): The use of satellite data to support the structural health monitoring in areas affected by slow-moving landslides: a potential application to reinforced concrete buildings. *Structural Health Monitoring*, 1–23. DOI: 10.1177/1475921720983232
- Milillo P., Giardina G., DeJong M.J., Perissin D., Milillo G., (2018). Multi-temporal InSAR structural damage assessment: The London crossrail case study. *Remote Sensing*, 10, 287.
- MIT Ministero delle infrastrutture e dei trasporti. 2018. Italian Code for Structural Design, Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M. 17/1/2018, (GU Serie Generale n.42 del 20-02-2018 - Suppl. Ordinario n. 8) (In Italian).
- Moretto S., Bozzano F., Esposito C., Mazzanti P., Rocca A., (2017). Assessment of Landslide Pre-Failure Monitoring and Forecasting Using Satellite SAR Interferometry. *Geosciences*, 7, 36, doi:10.3390/geosciences7020036
- Nappo N., Ferrario M.F., Livio F., Michetti A.M. (2020). Regression Analysis of Subsidence in the Como Basin (Northern Italy): New Insights on Natural and Anthropogenic Drivers from InSAR Data. *Remote Sensing*, 12, 2931. <https://doi.org/10.3390/rs12182931>
- Nappo N., Peduto D., Mavrouli O., van Westen C.J., Gullà, G., (2019). Slow-moving landslides interacting with the road network: Analysis of damage using ancillary data, in situ surveys and multi-source monitoring data. *Engineering Geology*, 260, 105244. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105244>

- Orhan O., Oliver-Cabrera T., Wdowinski S., Yalvac S., Yakar M. (2021). Land Subsidence and Its Relations with Sinkhole Activity in Karapınar Region, Turkey: A Multi-Sensor InSAR Time Series Study. *Sensors*, 21, 774. <https://doi.org/10.3390/s21030774>
- Papoutsis I., Kontoes C., Alatza S., Apostolakis A., Loupasakis C., (2020). InSAR Greece with Parallelized Persistent Scatterer Interferometry: A National Ground Motion Service for Big Copernicus Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, 12, 3207, doi:10.3390/rs12193207
- Raspini F., Bardi F., Bianchini S., Ciampalini A., Del Ventisette C., Farina P., Ferrigno F., Solari L., Casagli N., (2017). The contribution of satellite SAR-derived displacement measurements in landslide risk management practices. *Natural Hazards*, 86, 327–351. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2691-4>
- Rosi A., Tofani V., Agostini A., Tanteri L., Stefanelli C. T., Catani F., Casagli N., (2016). Subsidence mapping at regional scale using persistent scatterers interferometry (PSI): the case of Tuscany region (Italy). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 328–337. doi: 10.1016/j.jag.2016.07.003
- Rucci A., Vasco D. W., Novali F (2013). Monitoring the geologic storage of carbon dioxide using multicomponent SAR interferometry. *Geophysical Journal International*, 193, 1, 197–208.
- Solari L., Ciampalini A., Raspini F., Bianchini S., Moretti S., (2016). PSInSAR Analysis in the Pisa Urban Area (Italy): A Case Study of Subsidence Related to Stratigraphical Factors and Urbanization. *Remote Sensing*, 8, 120.
- Scoular J., Ghail R., Mason P., Lawrence J., Bellhouse M., Holley R., Morgan T. (2020). Retrospective InSAR Analysis of East London during the Construction of the Lee Tunnel. *Remote Sensing*, 12, 849. <https://doi.org/10.3390/rs12050849>
- Solari L., Del Soldato M., Raspini F., Barra A., Bianchini S., Confuorto P., Casagli N., Crosetto M. (2020). Review of Satellite Interferometry for Landslide Detection in Italy. *Remote Sensing*, 12, 1351. <https://doi.org/10.3390/rs12081351>
- Stramondo S., Bozzano F., Marra F., Wegmuller U., Cinti F.R., Moro M., Saroli M., (2008). Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3160-3172.
- Terzaghi K., Peck R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons
- Theron A., Engelbrecht J. (2018). The Role of Earth Observation, with a Focus on SAR Interferometry, for Sinkhole Hazard Assessment. *Remote Sensing*, 10, 1506. <https://doi.org/10.3390/rs10101506>
- Tosi L., Carbognin L., Teatini P., Strozzi T., Wegmüller U. (2002). Evidence of the present relative land stability of Venice, Italy, from land, sea, and space observations. *Geophysical Research Letters*, 29, 3-1–3-4
- Tosi L., Teatini P., Strozzi T., (2013). Natural versus anthropogenic subsidence of Venice. *Scientific Reports*, 3, 2710
- Waltham A.C., Fookes P.G., (2003). Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36, 101–118.

5 GRUPPO DI LAVORO

Il presente Documento è stato predisposto nell'ambito delle attività del Progetto DPC-ReLUIIS 2019-2021 – WP6 Monitoraggio e Dati Satellitari, da **un Gruppo di Lavoro** costituito da:

Per il Dipartimento della Protezione Civile
Mauro Dolce

Per l'Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)
Manuela Bonano – Riccardo Lanari

Per Reluis
Diego Alejandro Talledo– Alberto Stella – Anna Saetta
Università IUAV di Venezia

Andrea Miano – Annalisa Mele – Andrea Prota
Università di Napoli “Federico II”

Fabio Di Carlo – Alberto Meda
Università di Roma “Tor Vergata”

Giovanni Fabbrocino
Università degli Studi del Molise

Francesca Bozzano – Gabriele Scarascia Mugnozza
Centro di Ricerca CERI della Sapienza Università di Roma

Con il Coordinamento di:

Marco Savoia
Università di Bologna

Felice Ponzio
Università degli Studi della Basilicata

Hanno inoltre contribuito al documento:

Per il Dipartimento della Protezione Civile
Daniela Di Bucci, Francesco Giordano, Roberta Giuliani

Per l'Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)
Michele Manunta, Francesco Casu, Mariarosaria Manzo

Per Reluis
Daniele Sivori – Serena Cattari
Università di Genova

Gaetano Miraglia – Rosario Ceravolo
Politecnico di Torino

Loris Vincenzi
Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

Paolo Mazzanti – Nicoletta Nappo
Centro di Ricerca CERI della Sapienza Università di Roma

Emanuele Petracca
Università degli Studi del Molise

Andrea Doria
Università Iuav di Venezia

Nella versione definitiva del presente documento verranno inclusi i contributi di tutte le unità di ricerca coinvolte nel Progetto DPC-ReLUIIS 2019-2021 – *WP6 Monitoraggio e Dati Satellitari*

BONZINI