

USO INTEGRATO DEI SENSORI SATELLITARI SAR IN BANDA X E L PER QUANTIFICARE L'ETEROGENEITÀ DELLA SUBSIDENZA IN AMBIENTI COSTIERI DI TRANSIZIONE: LA LAGUNA DI VENEZIA

CRISTINA DA LIO*, TAZIO STROZZI**, PIETRO TEATINI*.,***,
LUIGI TOSI*

1. *Introduzione*

Le livellazioni geometriche sono state nel secolo scorso l'unico metodo di rilievo altimetrico che abbia consentito di misurare con precisione l'entità della subsidenza "moderna" dell'area costiera nord adriatica. Solo alla fine degli anni '90 è stata installata una rete per misurazioni GPS in differenziale (DGPS) e in continuo (CGPS) [1].

Nel nuovo millennio, l'uso del radar ad apertura sintetica (*Synthetic Aperture Radar*, SAR) montato su vettori satellitari, ha consentito lo sviluppo e l'affinamento dell'analisi dell'interferometria differenziale (InSAR) e dell'analisi interferometrica su riflettori persistenti (*Persistent Scatterers*, PSI), aumentando notevolmente la capacità di monitorare i movimenti del suolo e aprendo nuove possibilità per una più accurata interpretazione del processo di subsidenza e delle forzanti che la caratterizzano.

L'interferometria SAR utilizza come "punti" di monitoraggio le strutture riflettenti comunemente distribuite sul territorio come edifici, strade, ponti, dighe, rilevati arginali, rocce esposte, strutture

* Istituto di Scienze Marine (ISMAR), Consiglio Nazionale delle Ricerche, Venezia, Italia.

** GAMMA Remote Sensing, Gümliigen, Svizzera.

*** Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA), Università degli Studi di Padova, Italia.

metalliche e altre infrastrutture. Tuttavia, in ambienti umidi naturali come quelli deltizi e lagunari, prevale la presenza di vegetazione che, mutando le proprie caratteristiche elettromagnetiche nel corto periodo, non costituisce un diffusore coerente nel tempo, limitando o precludendo l'uso dell'interferometria SAR per la scarsità o l'assenza di riflettori.

Ciò nonostante, l'interferometria ha consentito di misurare la subsidenza anche in alcuni settori della Laguna di Venezia non accessibili a rilievi geodetici e GPS [e.g., 1-4]. Le informazioni ottenute hanno evidenziato la presenza di una forte eterogeneità spaziale dei movimenti del suolo con la necessità di sviluppare nuove metodologie di monitoraggio specifiche per questi ambienti.

Sono stati quindi sperimentati riflettori artificiali [5] installati su barene e bassifondali lagunari che hanno permesso di quantificare i movimenti del suolo in circa 50 siti interni alla laguna, confermando la forte variabilità della subsidenza di questi ambienti e l'inadeguatezza di estrapolare su ampie zone lagunari i dati acquisiti su pochi punti.

Recentemente, sono stati analizzati i risultati interferometrici ottenuti da sensori SAR con bande diverse che, avendo caratteristiche di acquisizione differenti, consentono di individuare movimenti del suolo in ambienti a diverso grado di urbanizzazione ovviando alla riduzione di decorrelazione temporale e spaziale propria degli ambienti meno urbanizzati. Ad esempio, [6] ha confrontato dati di ERS-1/2 con dati di ALOS PALSAR sulla zona della miniera di sale di Wieliczka, in Polonia. L'obiettivo è stato quello di estendere la copertura del monitoraggio SAR ad aree poco antropizzate, per le quali la banda C di ERS-1/2 non risulta particolarmente efficace, al contrario della banda L di ALOS PALSAR che, sfruttando la maggiore lunghezza d'onda, risente in modo minore della decorrelazione temporale e spaziale. [7] ha sottolineato i vantaggi dell'uso sinergico dei dati TerraSAR-X e ALOS PALSAR per monitorare versanti instabili ad Hong Kong, Cina. L'elaborazione in banda L è stata utilizzata per monitorare le zone naturali su vasta scala sfruttando l'elevata coerenza nelle aree vegetate, mentre i dati in banda X hanno permesso di estrarre informazioni dettagliate, ad esempio identificando i confini di versante instabili, sfruttando l'alta risoluzione ed i brevi tempi rivisitazione.

Le informazioni che sensori SAR con diverse lunghezze d'onda possono fornire sono pertanto di gran vantaggio per ottenere una maggior copertura di informazioni sui movimenti del suolo nelle aree umide con poche strutture antropiche riflettenti e dove l'accessibilità diventa impegnativa o preclusa alle livellazioni e misure CGPS.

Nella presente nota si illustra un approccio originale per integrare in modo ottimale i risultati della tecnica PSI su immagini COSMO-SkyMed in banda X con quelli forniti dalla tecnica InSAR su acquisizioni ALOS PALSAR in banda L. Data l'elevata risoluzione delle immagini in banda X e la precisione della tecnica PSI, i primi consentono di monitorare spostamenti di strutture antropiche, anche di piccola dimensione, sparse nell'area di studio; grazie all'elevata coerenza temporale nel lungo tempo delle immagini in banda L, i secondi permettono di valutare i movimenti del suolo in ambienti naturali come barene, aree umide e zone coltivate presenti in Laguna di Venezia. Vista la sua generalità, la metodologia integrata sviluppata potrà essere applicata a qualsivoglia ambiente naturale di transizione.

2. *Materiali e metodi*

2.1. *Prodotti interferometrici SAR*

Questo studio si basa su dati acquisiti da satelliti con sensori SAR e caratteristiche di acquisizione differenti:

- ALOS PALSAR in banda L (~24 cm di lunghezza d'onda), polarizzazione HH, angolo di incidenza 35° e risoluzione nominale spaziale 10 x 5 m;
- COSMO-SkyMed in banda X (~3 cm di lunghezza d'onda), polarizzazione HH, angolo di incidenza 34° e risoluzione nominale di 3 x 3 m a pixel.

Sono state processate 16 immagini stripmap ALOS PALSAR con orbita discendente acquisite nel periodo 15/01/2007 - 26/07/2010 e 31 immagini stripmap COSMO-SkyMed con orbita discendente relative al periodo 26/09/2008 - 17/07/2011.

Le immagini ALOS PALSAR sono state processate con la tecnica *Small Baseline Subsets* (SBAS) [8] utilizzando il software di elaborazione InSAR commercializzato da GAMMA [9]. Questo approccio permette di produrre sequenze temporali di deformazione a scala di pixel anche con un numero relativamente ridotto di immagini processando interferogrammi con baseline spaziale e temporale ridotta. Per l'analisi delle immagini COSMO-SkyMed, ben più numerose, si è utilizzata la tecnica PSI chiamata *Interferometric Point Target Analysis* (IPTA) [10], come descritto in [3]. Le misure di movimento del suolo derivanti da IPTA vengono interpretate per un numero di bersagli riflettenti con fase stabile (*point targets*, PTs) che sono coerenti sull'intero intervallo di tempo.

2.2. Misure GPS per la calibrazione e validazione dei dati interferometrici

Per ottenere precisioni millimetriche sulle misure dei movimenti del suolo, è fondamentale calibrare i prodotti interferometrici con misure in-situ. Negli ultimi anni sono state installate decine di stazioni GPS/GNSS permanenti lungo la costa Nord Adriatica da diverse Autorità. Molte di queste stazioni sono state collegate nelle reti Nazionali ed Internazionali, ad es. la Rete GPS della Regione del Veneto [11], FReDNet di OGS e Regione Friuli [12], MAGNET – University of Nevada [13], Jet Propulsion Laboratory – NASA [14], SOPAC – University of California, San Diego [15].

Ciò nonostante, a causa dell'irregolarità della registrazione e della lunghezza temporale talvolta limitata a pochi anni, le velocità di movimento del suolo fornite dalle stazioni GPS/GNSS presentano incertezze troppo elevate per essere utilizzabili nella calibrazione/validazione dei prodotti interferometrici SAR. Fra le stazioni GPS localizzate all'interno dei frame di COSMO-SkyMed e ALOS PALSAR, le seguenti sette hanno fornito serie temporali di misurazioni ragionevolmente lunghe e complete: TRVS (Treviso), ODEZ (Oderzo), VEN1 (Venezia centro storico), SFEL (San Felice, Chioggia), PTO1 (Porto Tolle), SDNA (San Donà di Piave), and TGPO (Taglio di Po) (Fig. 1, Tab. I).

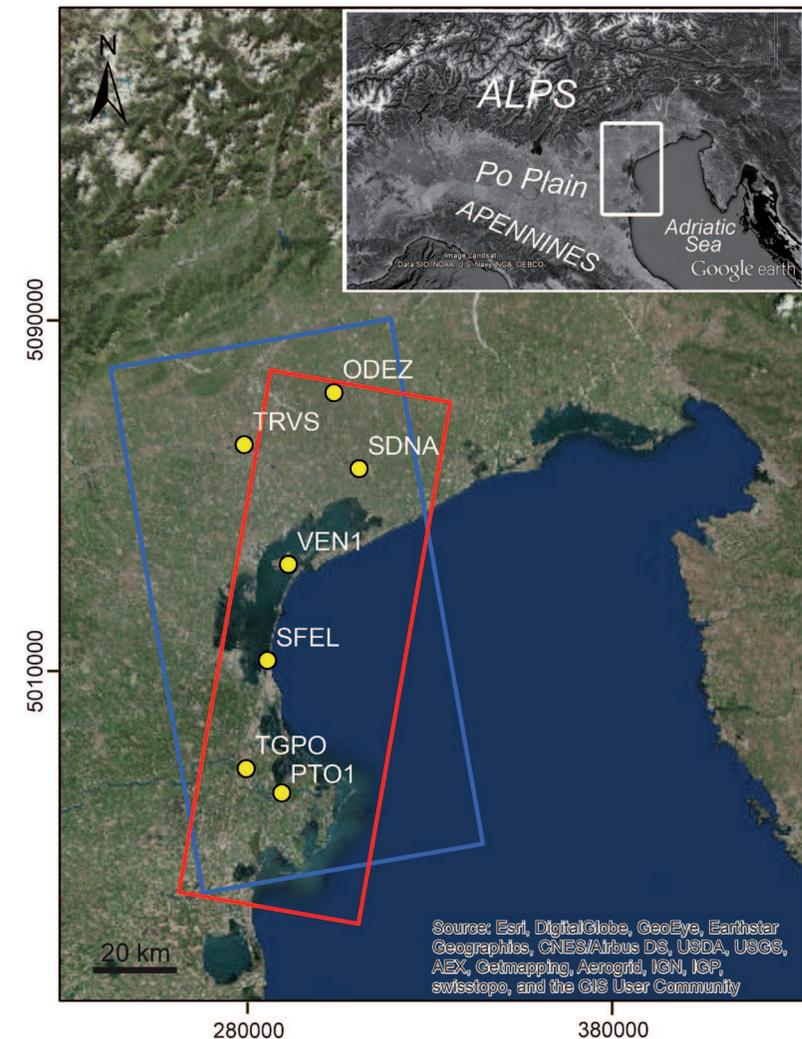


Fig. 1 - Frame di ALOS PALSAR 890/900 (blu) e Cosmo-SkyMed Track 639 (rosso). In giallo sono indicate le posizioni delle stazioni GPS permanenti (Tab. I) utilizzate per "agganciare" la soluzione SAR ad un sistema di riferimento assoluto [modificata da 26]

Tab. I - Posizione, intervallo temporale e componenti delle velocità est (E), nord (N), e verticale (UP) delle stazioni GPS in continuo selezionate. E, N e UP si riferiscono all'intervallo temporale utilizzato. Le serie di velocità derivano da Nevada Geodetic Laboratory (NGL) [13].

GPS ID	Nome Stazione GPS	Lon (deg)	Lat (deg)	Intervallo temporale (anni)	Intervallo temporale utilizzato (anni)	E (mm/a)	N (mm/a)	UP (mm/a)
TRVS	Treviso	12.222	45.680	2009–2015	2009–2012	21.1	17.5	-1.0
ODEZ	Oderzo	12.489	45.788	2011–2015	2011–2014	20.5	16.8	-2.3
VEN1	Venice	12.354	45.431	2008–2015	2008–2011	21.1	16.6	-0.6
SFEL	San Felice	12.291	45.230	2001–2010	2007–2010	16.9	13.6	-8.0
	Porto Tolle							
PTO1	Porto Tolle	12.334	44.952	2011–2015	2011–2014	20.8	16.9	-4.9
	San Donà di Piave							
SDNA	San Donà di Piave	12.564	45.630	2008–2015	2008–2012	21.3	17.3	-1.9
TGPO	Taglio di Po	12.228	45.003	2007–2015	2007–2011	21.3	16.2	-5.2

3. Calibrazione

Le soluzioni interferometriche in banda X e L sono state calibrate con le velocità di movimento del suolo registrate dalle stazioni GPS (ODEZ, PTO1, VEN1 e TRVS, PTO1, VEN1). La procedura consente di mitigare il cosiddetto problema di 'flattening', cioè la leggera inclinazione della fase risultante dalla non perfetta conoscenza delle posizioni satellitari [16-18] (Tab. II).

Si noti che gli intervalli temporali delle serie CGPS differiscono tra loro e sono in genere diversi da quelli dalle immagini SAR. Tuttavia, sulla base dei risultati di indagini precedenti [19], si può ragionevolmente assumere che le cause della subsidenza siano generalmente rimaste invariate nel corso del decennio 2005-2015; pertanto è ragionevole l'utilizzo di serie temporali CGPS leggermente diverse da quelle per le procedure di calibrazione/validazione. La soluzione

IGS08 delle serie CGPS indica inoltre movimenti orizzontali abbastanza simili tra le stazioni: 20.5-21.3 mm/a nella componente nord e 16.2-17.5 mm/a nella componente est (Tab. I). Queste velocità indicano un movimento pressoché rigido della porzione di placca Euroasiatica riguardante la zona di studio rispetto al riferimento IGS08.

Poiché l'interferometria SAR restituisce spostamenti relativi, si è definito un sistema di riferimento locale basato sulla stazione permanente GPS TRVS ubicata esternamente all'area di studio e alla parte della costa maggiormente subsidente. In questo modo le componenti dello spostamento relativo nelle direzioni nord ed est per tutte le altre stazioni GPS si annullano (Tab. I), mentre le componenti verticali rimangono invariate.

Inoltre, il SAR fornisce i movimenti del suolo lungo la linea di vista del satellite *Line of Sight* (LOS) i.e. tra il satellite stesso e gli obiettivi a terra. Per riferire quindi i movimenti dei GPS e del SAR allo stesso sistema di riferimento, si sono proiettate le velocità dei GPS del sistema di riferimento locale lungo la direzione LOS per mezzo della relazione:

$$GPS_{LOS} = \sin(\theta)\cos(\phi)E + \sin(\theta)\sin(\phi)N + \cos(\theta)UP$$

dove θ è l'angolo di incidenza del segnale del satellite con la verticale e ϕ l'angolo di inclinazione dell'orbita del satellite rispetto la direzione Nord.

Tab. II - Calibrazione dei dati. Le velocità dei CGPS sono state proiettate lungo la direzione LOS di COSMO-SkyMed (ODEZ, PTO1, VEN1) e ALOS PALSAR (TRVS, PTO1, VEN1). LOSc è la velocità media calibrata in un intorno opportuno dei CGPS grande abbastanza da includere un numero significativo di pixels/PTs (più di cinque) ma non troppo da escludere gli effetti delle eterogeneità del sottosuolo.

Stazione CGPS	CGPS LOS (mm/a)	LOSc (mm/a)	# pixels/PTs
ODEZ	-2.3	-2.2 ± 0.5	31
PTO1	-4.3	-5.1 ± 0.6	66
VEN1	-0.6	-0.7 ± 0.8	10
TRVS	-0.8	-1.0 ± 0.1	15
PTO1	-3.7	-4.2 ± 0.1	9
VEN1	-0.6	-0.5 ± 0.1	20

La validazione dei due set di dati SAR calibrati è stata eseguita utilizzando le stazioni CGPS non considerate in fase di calibrazione.

Nello specifico, in Fig. 2 sono poste a confronto le serie temporali di movimento del suolo misurate dai CGPS con quelle di un PT rappresentativo di COSMO-SkyMed prossimo alle stazioni GPS; per quanto riguarda ALOS PALSAR, la buona validazione si denota dal confronto fra le velocità di movimento verticale dei CGPS e quelle della soluzione calibrata SBAS in un intorno dei CGPS (Tab. III).

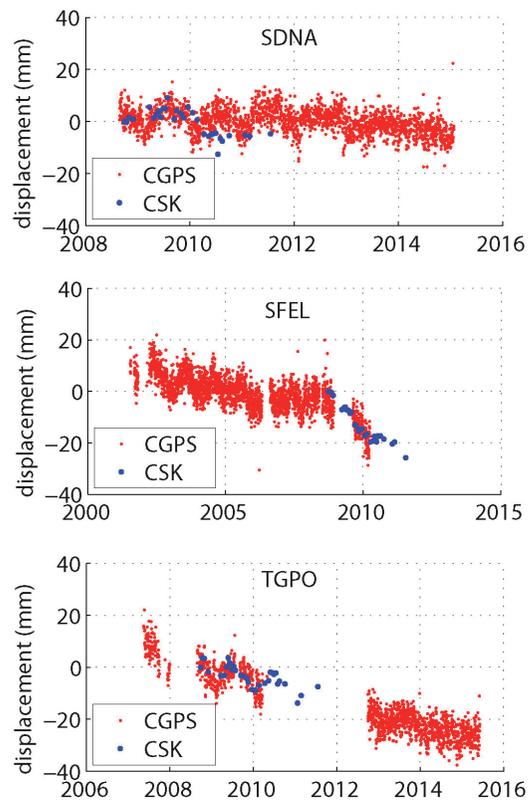


Fig. 2 - Validazione dei dati. Confronto fra le velocità dei CGPS proiettate lungo la direzione LOS di COSMO-SkyMed (rosso) con la velocità calibrata IPTA di un point target rappresentativo (blu) in un intorno dei CGPS [modificata da 26]

Tab. III - Validazione dei dati. Confronto fra le velocità dei CGPS proiettate lungo la direzione LOS di ALOS PALSAR con le velocità calibrate SBAS (LOSc) in un intorno dei CGPS grande abbastanza da includere un numero significativo di pixels ma non troppo da escludere gli effetti delle eterogeneità del sottosuolo.

Stazione CGPS	CGPS LOS (mm/a)	LOSc (mm/a)	#Pixels
TGPO	-4.4	-4.1 ± 0.2	13
ODEZ	-1.5	-1.9 ± 0.1	16

4. Risultati

4.1. Confronto fra i risultati di banda L e banda X

La differente capacità di acquisire informazioni sui movimenti del suolo fornita da ALOS PALSAR (SBAS) e COSMO-SkyMed (IPTA) è ben evidente in tutta la Laguna di Venezia; si osserva una sorta di “complementarietà” della distribuzione areale dei punti osservati (Fig. 3 e Fig. 4).

Nelle barene e negli ambienti intertidali del settore nord della laguna (Fig. 3), il numero di misure ottenute da ALOS PALSAR è considerevole, mentre i punti misurati con COSMO-SkyMed sono quasi assenti. La capacità della banda L di penetrare la vegetazione alofila che cresce nelle barene ha permesso di quantificare la subsidenza di alcune barene tra 5 e 10 mm/a, valori inaspettati e decisamente elevati (Fig. 3a). Questa informazione assume un ruolo fondamentale nella valutazione delle condizioni nelle quali i feedback eco-geomorfologici permettono alle aree umide costiere di adattarsi alle variazioni del medio mare relativo presente e ai cambiamenti attesi secondo le proiezioni future [20,21]. L'efficienza di COSMO-SkyMed è invece specifica per le misurazioni in corrispondenza degli argini delle valli da pesca, che occupano il settore più settentrionale della laguna (Fig. 3b).

Le due distribuzioni di frequenza di velocità, *probability density functions* (pdf(v)), presentano lo stesso valore modale (-2 mm/a), quella relativa a COSMO-SkyMed è caratterizzata da una frequenza significativa per $v=0$ mm/a mentre quella delle velocità acquisite da ALOS PALSAR mette in risalto una coda asimmetrica negativa. Poiché si

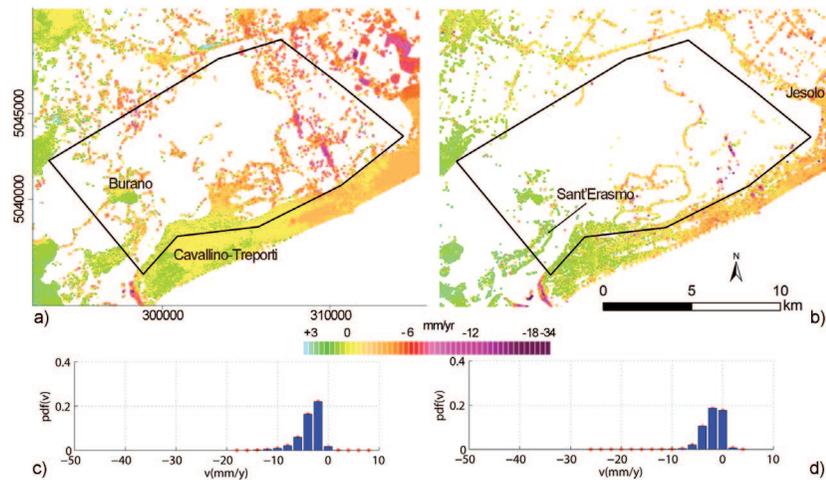


Fig. 3 - Laguna Nord: velocità medie di movimento del suolo calibrate ottenute da (a) ALOS PALSAR e (b) COSMO-SkyMed (mm/a), rispettivamente nel periodo 2007-2010 e 2008-2011; (c,d) distribuzioni di frequenza di velocità di movimento del suolo ($pdf(v)$) di pixels e point targets situati nel poligono evidenziato in linea continua nera. Valori negativi indicano subsidenza, positivi sollevamento [modificata da 26].

può ragionevolmente assumere non siano state costruite nuove strutture nel periodo analizzato, IPTA consente di sottolineare come le strutture presenti in laguna nord, caratterizzate da una certa profondità di infissione/fondazione siano relativamente stabili; SBAS, invece, restituendo informazioni dalla superficie naturale del suolo, evidenzia che la subsidenza superficiale che caratterizza gli ambienti lagunari, rappresenta in quest'area la frazione principale della subsidenza totale.

Il trend regionale della subsidenza aumenta passando dalla zona pressoché stabile di Burano e dell'isola di Sant'Erasmus verso la zona più settentrionale della laguna, a conferma della tendenza già osservata negli ultimi due decenni [1,3,18,22-25].

Nella laguna centrale e meridionale le informazioni sulla velocità dei movimenti del suolo ottenute da ALOS PALSAR e soprattutto da COSMO-SkyMed sono molto ridotte (Fig. 4), con una densità spaziale di circa 14 punti/km². Tuttavia, la banda L consente il monito-

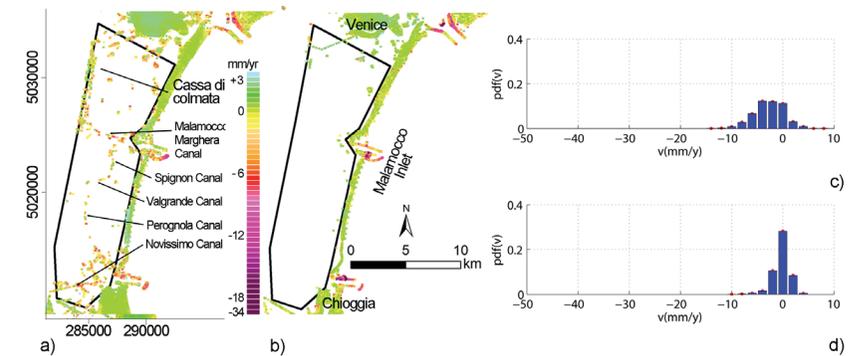


Fig. 4 - Laguna centrale e laguna sud: velocità medie di movimento del suolo calibrate ottenute da (a) ALOS PALSAR e (b) COSMO-SkyMed (mm/a) nel periodo 2007-2010 e 2008-2011, rispettivamente; (c,d) distribuzioni di frequenza di velocità di movimento del suolo ($pdf(v)$) di pixels e point targets situati nel poligono evidenziato in linea continua nera. Valori negativi indicano subsidenza, positivi sollevamento [modificata da 26].

raggio nelle aree poco vegetate come i margini delle Casse di Colmata (le isole artificiali), delle "briccole" (cioè i pali di legno che segnalano i canali), delle velme (strutture geomorfologiche situate a circa -0.2 m slm), dei capanni dei pescatori e delle reti di mitilicoltura che si trovano lungo i bordi dei canali Spignon, Valgrande, Perognola e Novissimo a sud della bocca di Malamocco. In questi settori lagunari, ALOS PALSAR evidenzia valori di velocità di subsidenza molto variabili: la $pdf(v)$ è caratterizzata da una frequenza quasi uguale per le classi di spostamento 0, -2, -4 mm/a. COSMO-SkyMed invece, presenta una $pdf(v)$ molto stretta con moda uguale a 0 mm/a, ad evidenziare la stabilità delle piccole isole rilevabili dal satellite in banda X.

Infine, per evidenziare maggiormente la complementarità dei dataset ALOS PALSAR e COSMO-SkyMed, sono state selezionate due aree esemplificative ad una scala più locale rispetto quanto sopra riportato. La prima è la parte di laguna più settentrionale con i territori agricoli circostanti, la seconda è ubicata nella porzione meridionale della laguna, e comprende il margine con l'entroterra e la città di Chioggia (Fig. 5). In generale, le velocità di movimento del suolo

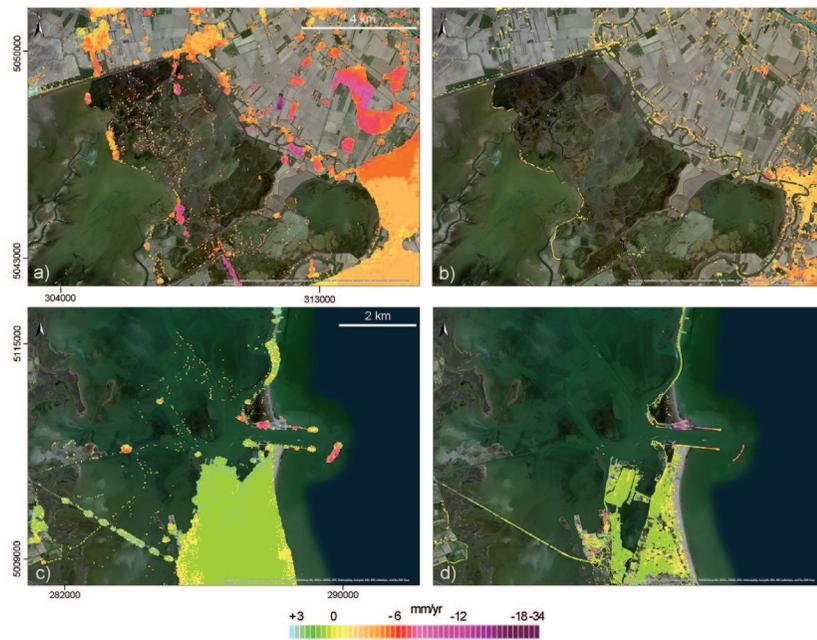


Fig. 5 - Velocità medie di movimento del suolo ottenute da: (a) ALOS PALSAR e (b) COSMO-SkyMed nel nord della laguna di Venezia; (c) ALOS PALSAR e (d) COSMO-SkyMed nel sud della laguna di Venezia. Valori negativi indicano subsidenza, positivi sollevamento. L'immagine di sfondo è da Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, Swisstopo, and the GIS User Community [modificata da 26].

ottenute dalle bande X e L sono simili quando le due serie di dati si sovrappongono, anche se una certa differenza si verifica in alcune zone. La banda X con IPTA permette di misurare un numero significativo di PTs lungo i principali argini fluviali e lagunari e nelle zone urbanizzate, mentre solo pochi riflettori radar vengono rilevati all'interno del bacino lagunare in corrispondenza di zone barenali e nei territori agricoli. Il vantaggio della banda L con SBAS si evidenzia chiaramente nelle zone lagunari interne e nei campi coltivati dove viene rilevato un cospicuo numero di dati.

4.2. Risultati Multi-Banda combinati

Per migliorare la conoscenza degli spostamenti del suolo i prodotti di COSMO-SkyMed / IPTA e ALOS PALSAR / SBAS sono stati combinati in modo da far risaltare le diverse potenzialità dei due sensori e delle tecniche di processamento, ovvero l'elevata precisione degli spostamenti rilevati dalla banda X IPTA su strutture antropiche e l'elevata coerenza temporale nel lungo periodo della banda L SBAS che permette di valutare gli spostamenti del terreno in ambienti naturali.

L'integrazione è stata eseguita combinando i due set di dati in modo ragionato e diverso a seconda della scala di indagine.

Su scala regionale, cioè, alla scala dell'intera area di studio, i due dataset sono stati uniti ed interpolati utilizzando il metodo di Kriging su una griglia a maglia regolare di 100 m. Un effetto *nugget* dell'ordine 0.7 mm/a, come suggerito dal variogramma sperimentale, è stato inserito per filtrare la grande variabilità locale.

Alla scala locale, vale a dire alla scala di pochi km², dove il rapporto punti/pixel può essere gestito manualmente, il metodo che è stato sviluppato può essere suddiviso nelle seguenti fasi: (1) sovrapposizione dei PT in banda X con i pixel in banda L su una mappa comune; (2) rimozione dei pixel in banda L che si trovano ad una distanza inferiore a 10 m da un PT, cioè la dimensione caratteristica del pixel banda L, in forza della maggiore precisione delle informazioni derivanti dalla banda X; (3) assemblaggio di un unico set di dati "migliorato" ed interpolazione con il metodo di Kriging su 10-m di griglia regolare [26].

La Fig. 6 mostra la mappa delle velocità medie di movimento del suolo ottenute a scala regionale. Con le zone centrali e meridionali della Laguna di Venezia stabili e gli abbassamenti non trascurabili della parte settentrionale, si conferma il trend regionale evidenziato in studi precedenti [1,2,4,18,27-30]. Tuttavia, la combinazione multi-banda rivela in modo dettagliato la distribuzione della velocità di subsidenza presente negli ambienti naturali e rurali senza perdere la precisione nel quantificare il movimento verticale di infrastrutture ed aree urbane. Alcuni esempi significativi sono i cedimenti da -3 a -5 mm/a che caratterizzano il bacino centrale e meridionale della laguna da un lato, e, dall'altro, l'importante compattazione dei terreni presso le co-

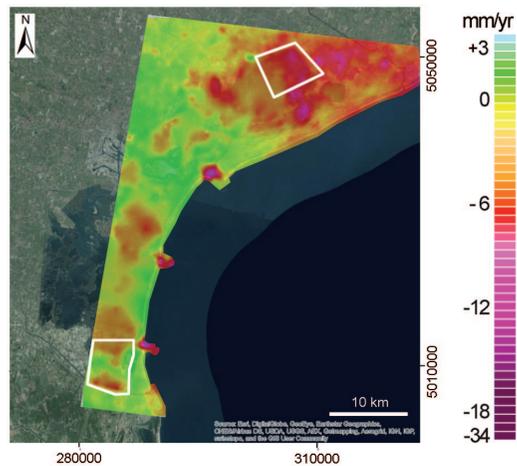


Fig. 6 - Mappa delle velocità medie dei movimenti del suolo ottenuta dalla combinazione dei prodotti interferometrici in banda L e in banda X alla scala regionale. Valori negativi indicano subsidenza, positivi sollevamento. I poligoni evidenziati in bianco rappresentano il posizionamento delle aree proposte in Fig. 7. L'immagine di sfondo è da Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, Swisstopo, and the GIS User Community [modificata da 26]

struzioni alle tre bocche di porto lagunari dove il progetto Mo.S.E. è in corso di realizzazione.

Al fine di evidenziare il massimo contributo delle due bande, sono state selezionate due aree locali rappresentative (Fig. 7). Queste sono principalmente caratterizzate da ambienti naturali o rurali, dove la presenza di vegetazione bassa non ostacola completamente la capacità di monitoraggio in banda L. Le zone sono delimitate o attraversate da infrastrutture lineari, come argini e ponti, i cui spostamenti possono essere misurati con grande precisione dalla banda X. Tali aree, la cui estensione areale è compresa tra 10 e 20 km², corrispondono alle parti settentrionale e meridionale della laguna di Venezia.

La Fig. 7 è organizzata come segue: ogni riga fornisce le velocità interpolate dei due satelliti per la stessa area e ogni colonna mostra

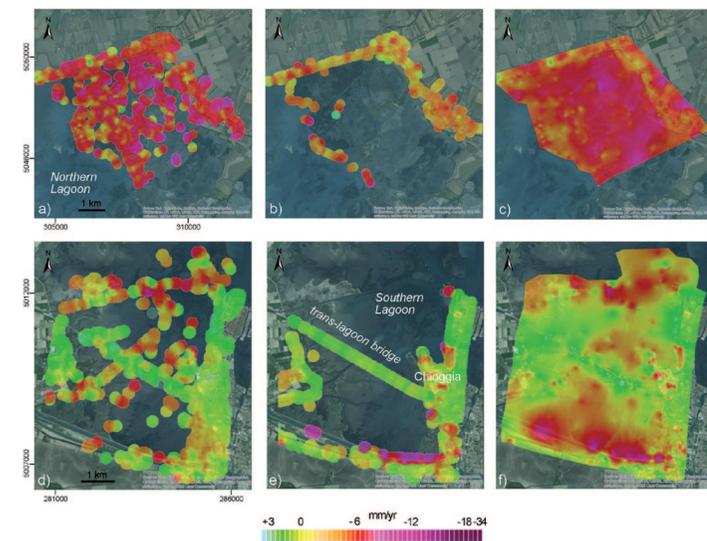


Fig. 7 - Mappe delle velocità medie di movimento del suolo ottenute dai prodotti interferometrici in banda L e in banda X alla scala locale. a), d) risultati di ALOS PALSAR; b), e) risultati di COSMO-SkyMed; c), f) mappe combinate. La posizione delle due aree è in Fig. 6. Valori negativi indicano subsidenza, positivi sollevamento. L'immagine di sfondo è da Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, Swisstopo, and the GIS User Community [modificata da 26].

la velocità interpolata dello stesso satellite per le varie aree. La prima (Fig. 7a,d) e la seconda colonna (Fig. 7b,e) mostrano le velocità di spostamento di ciascun pixel/PT attribuite ad un cerchio di 250 m di raggio ottenute rispettivamente da ALOS PALSAR e COSMO-SkyMed. Da notare:

- (i) la complementarità dei due set di dati in termini di distribuzione spaziale dei punti di monitoraggio rilevati, con le misurazioni in banda X principalmente collocate lungo i confini delle aree selezionate (Fig. 7b) o lungo il ponte che attraversa la laguna sud (Fig. 7e);
- (ii) la differenza significativa tra i tassi di movimento osservati nella parte interna (dalla banda SBAS) e in quella di confine (dalla

banda X IPTA) di ogni area. Si noti, per esempio, che nella parte settentrionale della Laguna di Venezia il tasso di subsidenza della zona naturale interna (Fig. 7a) è quasi pari al doppio dei valori presenti lungo gli argini (Fig. 7b), vale a dire una media di circa -7 mm/a contro i -4 mm/a di questi ultimi.

Le mappe combinate (Fig. 7c,f) mantengono le peculiarità intimamente connesse con il ruolo dei diversi processi che hanno contribuito alla subsidenza cumulata, e ne permettono il miglioramento dell'interpretazione. Nella parte settentrionale della laguna di Venezia i processi regionali sono responsabili delle velocità di subsidenza dell'ordine di 3-4 mm/a.

5. Conclusioni

I movimenti della superficie delle forme morfologiche e lagunari, come barene e piane tidali, sono difficilmente quantificabili a causa della ridotta accessibilità per le indagini tradizionali (livellazioni e GPS) e per la scarsa capacità dei sensori radar in banda C e X dovuta alla bassa coerenza delle zone vegetate e la mancanza di punti riflettenti. A causa della grande estensione areale della laguna, la densità areale di pixels/PTs può ridursi a meno di 150 punti/km².

Per ottenere il massimo vantaggio da sensori SAR a diversa banda, in questo studio si è adottata una strategia innovativa che consiste nell'integrazione dei loro risultati. Nello specifico, si è investigata la capacità di combinare i risultati interferometrici di ALOS PALSAR (banda L) e COSMO-SkyMed (banda X) in una sorta di nuovo unico dataset in banda L/X.

L'approccio multi-banda ha permesso di migliorare la copertura spaziale in ambienti fortemente eterogenei del sistema lagunare di Venezia. Inoltre, l'aumento del numero di punti di misura offerto dall'analisi combinata multi-banda ha permesso di migliorare notevolmente la conoscenza della subsidenza in atto rispetto a quanto si sarebbe potuto ottenere con l'utilizzo separato ed indipendente dei due satelliti.

Tale approccio ha rivelato un'eterogeneità dei movimenti del suolo maggiore rispetto a quanto mostrato da studi precedenti, dettata

dal diverso contributo dei processi superficiali e profondi alla subsidenza cumulata nei settori settentrionali, centrali e meridionali del bacino lagunare.

In conclusione, data l'importanza di un monitoraggio affidabile e preciso dei movimenti del suolo di lagune, zone umide e coltivate costiere in vista dell'innalzamento del livello del mare previsto, l'approccio combinato multi-banda presentato in questo studio rappresenta uno strumento importante che potrà essere utilizzato in altre zone costiere con caratteristiche fisiografiche simili al sistema lagunare di Venezia.

6. Ringraziamenti

Lavoro sviluppato all'interno del Progetto Bandiera RITMARE – la Ricerca Italiana per il Mare – coordinato dal Consiglio Nazionale delle Ricerche e finanziato dal MIUR all'interno del Programma di Ricerca Nazionale 2011-2013. Per cortesia dei dati: (1) COSMO-SkyMed AO, Project ID 2100 © ASI Land movements in the Venice Lagoon: measuring the natural/regional and anthropogenic/local components by SAR Interferometric Point Target Analysis (IPTA); (2) ALOS PALSAR, Project AOALO-3550, © JAXA; CGPS Time series, Nevada Geodetic Laboratory (NGL).

7. Bibliografia

- [1] Tosi, L.; Teatini, P.; Strozzi, T.; Carbognin, L.; Brancolini, G.; Rizzetto, F. Ground surface dynamics in the northern Adriatic coastland over the last two decades. *Rend. Lincei Sci. Fis.* (2010), 21, 115-129.
- [2] Teatini, P.; Tosi, L.; Strozzi, T.; Carbognin, L.; Wegmüller, U.; Rizzetto, F. Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system. *Remote Sens. Environ.* (2005), 98, 403-413.
- [3] Teatini, P.; Strozzi, T.; Tosi, L.; Wegmüller, U.; Werner, C.; Carbognin, L. Assessing short- and long-time displacements in the Venice coastland by synthetic aperture radar interferometric point target analysis. *J. Geophys. Res. Earth Surface* (2007), 112.
- [4] Tosi, L.; Teatini, P.; Strozzi, T.; Da Lio, C. Relative Land Subsidence of the Venice Coastland, Italy. In: (a cura di): Giorgio Lollino, Andrea Manconi, Jacques Locat,

- Yu Huang, Miquel Canals Artigas, *Engineering Geology for Society and Territory - Marine and Coastal Processes*. Springer International Publishing Switzerland, (2014); Volume 4, 171-173.
- [5] Strozzi, T.; Teatini, P.; Tosi, L.; Wegmüller, U.; Werner, C. Land subsidence of natural transitional environments by satellite radar interferometry on artificial reflectors. *J. Geophys. Res. Earth Surface* (2013), 118, 1177-1191.
- [6] Nitti, D.O.; De Vitis, L.; Bovenga, F.; Nutricato, R.; Refice, A.; Wasowski, J. Multi-temporal L-band SAR interferometry confirms C-band spatial patterns of subsidence in the ancient Wieliczka Salt Mine (Unesco Heritage Site, Poland). In *Proceedings of the Fringe 2009 Workshop, Frascati, Italy, 4 December (2009)*.
- [7] Chen, F.; Lin, H.; Hu, X. Slope superficial displacement monitoring by small baseline SAR interferometry using data from L-band ALOS PALSAR and X-band TerraSAR: A case study of Hong Kong, China. *Remote Sens.* (2014), 6, 1564-1586.
- [8] Bernardino, P.; Fornaro, G.; Lanari, R.; Sansosti, E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* (2002), 40, 2375-2383.
- [9] Werner, C.; Wegmüller, U.; Strozzi, T.; Wiesmann, A. Gamma SAR and interferometric processing software. In *ERS - ENVISAT Symposium, Gothenburg, Sweden (2000)*; 16-20.
- [10] Werner, C.; Wegmüller, U.; Strozzi, T.; Wiesmann, A. Interferometric point target analysis for deformation mapping. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2003)*; Toulouse, France, 21-25 July (2003); 4362-4364.
- [11] Veneto GPS Network. Available online: <http://retegnssveneto.cisas.unipd.it/Web/index.php> (accessed on November 2015).
- [12] FReDNet GPS Network. Available online: <http://frednet.crs.inogs.it/ItalianSite/XFReDNetHome.htm> (accessed on November 2015).
- [13] MAGNET GPS Network. Available online: <http://geodesy.unr.edu/billhammond/gpsnetmap/GPSNetMap.html> (accessed on November 2015).
- [14] Jet Propulsion Laboratory – GPS time series. Available online: <http://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html> (accessed on November 2015).
- [15] SOPAC GPS data. Available online: <http://sopac.ucsd.edu/map.shtml> (accessed on November 2015).
- [16] Teatini, P.; Tosi, L.; Strozzi, T.; Carbognin, L.; Cecconi, G.; Rosselli, R.; Libardo, S. Resolving land subsidence within the Venice Lagoon by persistent scatterer SAR interferometry. *Phys. Chem. Earth* (2012a), 40-41, 72-79.
- [17] Teatini, P.; Tosi, L.; Strozzi, T. Comment on “Recent subsidence of the Venice Lagoon from continuous GPS and interferometric synthetic aperture radar”. *Geochem. Geophys. Geosys.* (2012b), 13.
- [18] Tosi, L.; Teatini, P.; Strozzi, T. Natural versus anthropogenic subsidence of Venice. *Sci. Rep.* (2013), 3.
- [19] Tosi, L.; Teatini, P.; Carbognin, L.; Brancolini, G. Using high resolution data to reveal depth-dependent mechanisms that drive land subsidence: The Venice coast, Italy. *Tectonophysics* (2009), 474, 271-284.

- [20] Kirwan, M.L.; Guntenspergen, G.R.; D’Alpaos, A.; Morris, J.T.; Mudd, S.M.; Temmerman, S. Limits on the adaptability of coastal marshes to rising sea level. *Geophys. Res. Lett.* (2010), 37.
- [21] D’Alpaos, A.; Da Lio, C.; Marani, M. Biogeomorphology of tidal landforms: Physical and biological processes shaping the tidal landscape. *Ecohydrology* (2012), 5.
- [22] Teatini, P.; Gambolati, G.; Tosi, L. A new 3-D non-linear model of the subsidence of Venice. In *Land Subsidence*; Barends, F.B.J., Ed.; IAHS Publishing; Wallingford, UK, (1995); 353-361.
- [23] Carbognin L.; Marabini F.; Tosi L. Land subsidence and degradation of the Venice littoral zone, Italy. In: (eds.): FBJ Barends; FJJ Brouwer; FH Schröder, *Land Subsidence: by Fluid Withdrawal, by Solid Extraction, Theory and Modelling, Environmental Effects and Remedial*. International Association of Hydrological Sciences (IAHS Press), THE HAGUE, NETHERLANDS, (1995); Volume 234, 391-402.
- [24] Carbognin, L.; Teatini, P.; Tosi, L. Relative land subsidence in the lagoon of Venice, Italy, at the beginning of the new millennium. *J. Mar. Syst.* (2004), 51, 345-353.
- [25] Carbognin L.; Teatini, P.; Tosi, L. Land subsidence in the Venetian area: known and recent aspects. *Ital J Eng Geol Environ* (2005), 1, 5-11.
- [26] Tosi, L., Da Lio, C., Strozzi, T., Teatini, P. Combining L- and X-Band SAR Interferometry to Assess Ground Displacements in Heterogeneous Coastal Environments: The Po River Delta and Venice Lagoon, Italy. *Remote Sens.* (2016), 8, 308.
- [27] Carbognin, L.; Teatini, P.; Tosi, L.; Strozzi, T.; Tomasin, A. Present relative sea level rise in the northern Adriatic coastal area. In *Marine Research at CNR—Theme 3 “Coastal and Marine Spatial Planning”*; Brugnoli, E., Cavarretta, G., Mazzola, S., Trincardi, F., Ravaioli, M., Santoleri, R., Eds.; CNR-DTA: Roma, Italy, (2011); 1123-1138.
- [28] Teatini, P.; Tosi, L.; Strozzi, T. Quantitative evidence that compaction of Holocene sediments drives the present land subsidence of the Po Delta, Italy. *J. Geophys. Res. Solid Earth* (2011), 116.
- [29] Teatini, P.; Tosi, L.; Strozzi, T. Capability of X-Band Persistent Scatterer Interferometry to Monitor Land Subsidence in the Venice Lagoon. In: (a cura di): Giorgio Lollino, Andrea Manconi, Jacques Locat, Yu Huang, Miquel Canals Artigas, *Engineering Geology for Society and Territory - Marine and Coastal Processes*. Springer International Publishing Switzerland, (2014); Volume 4, 175-178.
- [30] Kourkoulis, P.; Wegmüller, U.; Teatini, P.; Tosi, L.; Strozzi, T.; Wiesmann, A.; Tansey, K. Ground deformation monitoring over Venice Lagoon using combined DInSAR/PSI techniques. In *Engineering Geology for Society and Territory*; Lollino, G., Ed.; Springer: Cham, Switzerland, (2014); Volume 4, 181-186.

ISTITUTO VENETO DI SCIENZE, LETTERE ED ARTI

COMMISSIONE DI STUDIO
SUI PROBLEMI DI VENEZIA

VOLUME
III

LA LAGUNA DI VENEZIA
E LE NUOVE OPERE ALLE BOCICHE

a cura di
LUIGI D'ALPAOS

Pubblicato nel mese di novembre 2017

All'indirizzo internet www.istitutoveneto.it è consultabile il catalogo delle più recenti pubblicazioni dell'Istituto Veneto.

Allo stesso indirizzo possono essere scaricati gratuitamente alcuni volumi in formato PDF.

VENEZIA
2017

I volumi possono essere acquistati presso l'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti (fax 041.5210598) oppure tramite il distributore CIERREVECCHI Srl (fax 049.8840277)