

archeologica del Colle Palatino e del Foro Romano Integrazione di tecniche radar interferometriche

Nicola Casagli, Deodato Tapete, Guido Luzi, Riccardo Fanti, Sara Del Conte, Davide Leva; *con prefazione di* Roberto Cecchi Kermes

RESTAURO ARCHEOLOGICO

Monitoraggio dell'area archeologica del Colle Palatino e del Foro Romano Integrazione di tecniche radar interferometriche

Nicola Casagli, Deodato Tapete, Guido Luzi, Riccardo Fanti, Sara Del Conte, Davide Leva; *con prefazione di* Roberto Cecchi

Prefazione

econdo il legislatore del 2004 cui si deve il Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, la leva della tutela "sulla base di un'adeguata attività conoscitiva" non può fare a meno del punto d'appoggio offerto dalla conoscenza. E dalla conoscenza si deve ripartire per organizzare la tutela di un immenso patrimonio archeologico come quello che a Roma si estende per migliaia di ettari, sviluppa chilometri quadrati di decorazioni e intonaci, conserva centinaia di migliaia di metri cubi di strutture, spesso incomplete. In nessun'altra parte d'Italia e del mondo si trova una densità paragonabile di strutture antiche da studiare, controllare, rendere sicure e fruibili.

Per rinvenire vantaggi sul piano della tutela e della conservazione si è ritenuto importante superare la segmentazione disciplinare e avviare confronti tra i settori specialistici coinvolti nelle indagini, negli studi e nella realizzazione delle opere. Nascono da tale gestazione la progettazione di oltre 70 interventi urgenti - cui seguirà una dettagliata fase di manutenzione programmata in grado di contrastare sul nascere il ripresentarsi di fenomeni di degrado – e l'elaborazione di un progetto generale di tutela in grado di affrontare le dimensioni e l'importanza del patrimonio archeologico di Roma e Ostia Antica. In questo senso è stato pensato il processo cognitivo multidisciplinare messo a punto per il monitoraggio del Palatino che si avvale anche di tecniche radar interferometriche. L'identificazione dei principali movimenti (allontanamento e/o avvicinamento) delle strutture e la localizzazione dei settori su cui approfondire controlli per conoscere le cause dell'instabilità ha trovato riscontro (e offerto conferme) nei risultati delle indagini sull'assetto geologico e idrogeologico del colle e sulla consistenza e la natura dello strato antropico.

Roberto Cecchi

Progetto di monitoraggio radar

Il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze, in qualità di Centro di Competenza del Dipartimento Nazionale della Protezione Civile, ha svolto, nel periodo aprile 2009-marzo 2010, un servizio di monitoraggio radar dell'area archeologica del Colle Palatino e del Foro Romano, fornendo un supporto scientifico-tecnologico nell'ambito degli interventi urgenti di protezione civile diretti a fronteggiare lo stato di emergenza in atto.

L'analisi preliminare alla pianificazione del progetto di monitoraggio ha confermato la persistenza di criticità conservative, riconoscendo le cause principali dei dissesti nelle interazioni fra le stratificazioni antropiche, il substrato geologico di fondazione e l'assetto idrogeologico locale.

Date l'estensione dell'area e la tipologia dei fenomeni di deformazione, è stato deciso di procedere con la realizzazione di un monitoraggio radar, articolato in (fig. 1):

 – analisi di dati telerilevati da satellite, elaborati con tecnica PSInSAR™ (*Permanent Scatterers Interferometric Synthetic Aperture Radar*) per l'intera area archeologica;

 analisi di dati acquisiti con strumentazione radar da terra GB-InSAR (*Ground-Based Interferometric Synthetic Aperture Radar*) per le *Sostruzioni Adrianee* e il settore NO della *Domus Tiberiana*.

L'impiego di tali tecniche di telerilevamento rappresenta un'applicazione innovativa nel campo della diagnostica del patrimonio costruito, in virtù dell'integrazione fra un monitoraggio a scala di sito archeologico e un monitoraggio a scala di monumento. Quest'ultimo è stato inteso a verificare la stabilità strutturale della *Domus Tiberiana* e si è avvalso di un rilievo tridimensionale eseguito con laser scanner terrestre, come supporto geometrico all'interpretazione delle misure GB-InSAR.

Nicola Casagli

Geologo, è professore ordinario di Geotecnica presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze.

RESTAURO

ARCHEOLOGICO

Deodato Tapete

Conservation scientist, è dottorando di ricerca in Scienze della Terra presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze.

Guido Luzi

Fisico, è professore associato presso l'unità di ricerca "Active Sensor" dell'Institut de' Geomàtica di Barcellona (Spagna).

Riccardo Fanti

Geologo, è ricercatore e docente di Idrogeologia presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze.

Sara Del Conte

Geologo, svolge attività di ricerca presso Tele-Rilevamento Europa -T.R.E. srl, Milano.

Davide Leva

Ingegnere presso Ellegi srl - LiSALab, Milano.

Roberto Cecchi

Architetto, è commissario delegato per la realizzazione degli interventi urgenti nelle aree archeologiche di Roma e Ostia Antica e riveste l'incarico di segretario generale del Ministero per i Beni e le Attività Culturali.

KERMES 82

RESTAURO ARCHEOLOGICO

Fig. 1 - Diagramma di flusso del servizio di monitoraggio radar integrato del Colle Palatino e Foro Romano (Roma).



L'analisi comparativa dei dati di monitoraggio con l'evidenza a terra e i dati geo-archeologici ha portato all'identificazione dei settori più critici, suggerendo indicazioni utili alla pianificazione di adeguate strategie di conservazione e restauro.

Tecniche di monitoraggio

RADAR DA SATELLITE - TECNICA PSINSARTM

Il monitoraggio radar da satellite è consistito nell'analisi di dati telerilevati dai satelliti europei ERS1, ERS2 e dal satellite canadese RADARSAT, dotati di un sistema radar ad apertura sintetica (SAR) operante in banda C (frequenza di 5,3 GHz, lunghezza d'onda $\lambda = 5,66$ cm) che consente di creare archivi storici di immagini dell'area di interesse, utili per lo studio delle deformazioni superficiali nel tempo (fig. 2A).

L'elaborazione delle immagini con tecniche "multi-interferogramma" o "multi-immagine" permette un'analisi quantitativa delle deformazioni con precisione millimetrica e la ricostruzione della loro evoluzione temporale (Ferretti et al., 2001; Colesanti et al., 2003). Applicazioni recenti hanno dimostrato che la tecnica PSInSAR™ è particolarmente indicata per l'individuazione di deformazioni superficiali e la mappatura di aree instabili in contesti urbani e monumentali (Cigna et al., 2011).

La tecnica si basa infatti sull'identificazione, all'interno del *dataset* di immagini, di bersagli a terra che mantengono inalterate le proprie caratteristiche elettromagnetiche al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche, fungendo quindi da diffusori permanenti (*Permanent Scatterers* o PS) (fig. 2B). Per ciascun bersaglio vengono ricavate le coordinate geografiche e la quota, le velocità medie e la serie temporale di deformazione.

L'impiego di tale tecnica in un contesto archeologico può risultare particolarmente efficace in quanto strutture murarie emergenti bene assolvono al ruolo di diffusori permanenti. Un'elevata densità di PS garantisce una sufficiente copertura dell'area di studio, ad eccezione delle sole aree vegetate dove la densità di bersagli radar è più rada.

In virtù delle caratteristiche dell'orbita della

Analisi satellitare dei trend di deformazione

L'analisi di dettaglio delle serie temporali di spostamento dei PS individuati nell'area monitorata (parr. "Radar da satellite - Tecnica PSInSARTM" e "Misure PSInSAR") permette la valutazione della stabilità strutturale dei corrispondenti elementi a terra (strutture archeologiche o suolo), verificando se gli spostamenti misurati da satellite sono effettivamente attribuibili a reali fenomeni di deformazione, passati o ancora in atto, piuttosto che a normali dinamiche di dilatazione/contrazione in risposta a escursioni termiche e cicli di evapo-traspirazione delle superfici esposte. In fase di radar interpretazione vengono considerati, in ordine, i seguenti parametri: valore della velocità media di deformazione calcolato sull'intero periodo di monitoraggio (v_m); distribuzione dei valori di v_m per uno stesso gruppo di PS riferibile al monumento di interesse; andamento degli spostamenti nel tempo all'interno della serie tempo-rale di deformazione (*trend di deformazione*); entità complessiva dello spostamento occorso. Tale analisi per livelli progressivi di valutazione è funzionale a confermare la reale presenza di deformazioni lungo la LOS, segnalando situazioni di potenziale criticità, passata o recente, non altrimenti rilevabili da una visione sinottica dei dati di monitoraggio. Spesso, un valore di v_m all'interno della "soglia di stabilità" (±1,5 mm/anno) o prossimo a 0 mm/anno (per cui il PS in esame verrebbe classificato come "stabile") in realtà può essere il risultato di molteplici fasi differenziali di spostamento di segno opposto, da cui consegue una complessiva stabilità sull'intero periodo di monitoraggio.

In Figura I vengono mostrate serie temporali di spostamento di PS individuati nell'area del Foro Romano e Colle Palatino, assumibili quali modelli di deformazione specificamente riconducibili a situazioni di stabilità/instabilità di strutture e suolo monitorati, in assenza/presenza di reali deformazioni a terra, in atto o passate. Una condizione di totale stabilità per il singolo PS individuato è visibile in Figura IA in cui il valore di v_m (+o,4 mm/anno) bene riflette l'assenza di spostamenti cumulati sull'intero periodo di monitoraggio. A simile valore di v_m possono altresì corrispondere fluttuazioni stagionali che, tuttavia, non configurano un *trend* di deformazione (Figura IB). Diversamente, un comportamento stagionale può assumere, nel tempo, un andamento chiaramente imputabile a una progressiva deformazione (Figura IC), con valore significativo di spostamento cumulato nell'intero intervallo temporale analizzato. Quanto più lineare e in costante progressione risulta l'andamento degli spostamenti misurati, tanto maggiore è il livello di criticità attribuito all'evento deformativo rilevato (in allontanamento rispetto al satellite – Figura ID; in avvicinamento – Figura IE), suggerendo opportuno allertamento per la verifica *in situ* della stabilità strutturale del corrispondente elemento a terra. Lo stato di un singolo PS può inoltre derivare dall'alternanza di fasi di deformazione a periodi di relativa stabilità (Figura IF), per cui sono riconoscibili fasi differenziali di spostamento con accelerazione della velocità di deformazione, interpretabili come effetto strutturale di eventi di destabilizzazione, circoscritti nel tempo, a carico dell'elemento monitorato.



Fig. I - Serie temporali di spostamento di singoli PS individuati nell'area del Foro Romano e Colle Palatino esemplificative di: A) situazioni di totale stabilità e assenza di deformazioni in atto; B) oscillazioni stagionali dei valori di spostamento non riferibili a fenomeni deformativi in atto; C) oscillazioni stagionali che configurano un trend deformativo; D) definito trend in allontanamento rispetto al satellite; E) definito trend in avvicinamento rispetto al satellite; F) alternanza di fasi di accelerazione (linea rossa) a fasi di relativa stabilità (linea verde). Gli spostamenti riportati in ordinata sono misurati lungo la LOS ed espressi in mm.

RESTAURO ARCHEOLOGICO



Fig. 2 - 2A) Elaborando grandi archivi di immagini SAR acquisite nel tempo da differenti piattaforme satellitari è possibile ricostruire le serie temporali di deformazione per i bersagli radar (PS) individuati nell'area monitorata. 2B) Sulla base della geometria di acquisizione (θ, angolo di vista), eventuali spostamenti e deformazioni delle strutture murarie (Δ d) occorsi nell'intervallo di tempo Δ t (tempo di rivisitazione del satellite) vengono rilevati lungo la LOS del satellite.

piattaforma satellitare, il territorio viene ripreso sia in fase "ascendente" che "discendente" sotto un costante angolo di vista (θ) e con osservazione verso destra secondo la linea di vista dello strumento (*Line Of Sight* – LOS), lungo la quale vengono misurate le componenti del vettore spostamento associato al movimento di deformazione (fig. 2B).

L'acquisizione di immagini SAR ad un intervallo temporale (Δt) pari al tempo di rivisitazione del satellite (35 e 24 giorni, rispettivamente, per i satelliti ERS1/2 e RADARSAT), sebbene non configuri un monitoraggio in tempo reale, permette la ricostruzione della storia deformativa di ogni singola area o monumento aggiornata al presente, consentendo l'identificazione di criticità conservative.

RADAR DA TERRA - GB-INSAR

Il monitoraggio delle deformazioni in atto sulla *Domus Tiberiana* è stato condotto con strumentazione radar basata a terra di proprietà del Dipartimento di Scienze della Terra, predisposta per l'occasione in collaborazione con Ellegi srl -LiSALab, partner di progetto. Si tratta di un radar interferometrico progettato per applicazioni da terra (GB-InSAR) con osservazione di aree circoscritte di superficie massima pari a 1-2 km², il cui principio di funzionamento è analogo a quello della tecnica dell'interferometria differenziale impiegata da satellite.

Lo strumento consente la misura senza contatto del campo degli spostamenti del terreno e di strutture architettoniche mediante la produzione di immagini SAR georiferite e multitemporali, attraverso le quali è possibile seguire in tempo "quasi-reale" l'evoluzione spaziale e temporale del quadro deformativo della scena ripresa. La versatilità di impiego permette applicazioni in contesti ambientali e urbani per finalità di monitoraggio e allertamento (Antonello et al., 2004; Casagli et al., 2010).

La formazione di immagini radar ad alta risoluzione spaziale è in questo caso ottenuta sfruttando il movimento di un ricetrasmettitore radar che assume in successione una serie di posizioni lungo un binario di lunghezza di 2,3 m (fig. 3A). La rapidità di acquisizione ed elaborazione dell'apparato consente di ottenere immagini con una cadenza di circa 6 minuti garantendo una continuità nel monitoraggio altrimenti impossibile con sensori satellitari. Impiegando segnali radar con lunghezza d'onda dell'ordine del centimetro, si può ottenere una precisione submillimetrica delle misure.

Data la geometria di acquisizione, il sistema GB-InSAR misura la proiezione lungo la LOS (S_{LOS}) dello spostamento reale che interessa il punto osservato (S), per cui quanto più la LOS e S sono paralleli, maggiore è il valore di S_{LOS}, misurato dal radar (fig. 3B).

Lo strumento è stato installato nel Foro

Romano nell'area antistante la *Basilica Emilia*, al di sopra di una struttura portante in tubi innocenti munita di copertura, su cui è stato fissato il binario che permette di muovere un castello dotato di due antenne, trasmittente e ricevente (fig. 3C). L'installazione in posizione rialzata rispetto al piano calpestabile, in un'area interdetta al pubblico, ha garantito lo svolgimento dell'attività di monitoraggio senza interruzioni della fruizione pubblica del sito archeologico, secondo le norme di sicurezza sui cantieri e con ridotto impatto estetico rispetto alle evidenze archeologiche limitrofe.

RILIEVO LASER SCANNER

Il rilievo laser scanner della *Domus Tiberiana* è stato pianificato come attività ausiliaria al monitoraggio radar da terra per la georeferenziazione e la corretta interpretazione spaziale dei dati GB-InSAR.

A tale scopo è stato impiegato un laser scanner terrestre a tempo di volo (modello Riegl LMS-Z420i), particolarmente indicato per rilievi di versanti instabili, centri storici urbani e complessi monumentali (Gigli et al., 2009), con distanze di lavoro fino a circa 1000 m e accuratezza millimetrica delle misure.

Sulla base dell'intervallo di tempo tra l'emissione di un impulso laser infrarosso e l'impulso di ritorno riflesso dalla superficie dell'oggetto e conoscendo la direzione del raggio laser nello spazio rispetto ad un sistema di riferimento interno allo strumento, ad ogni singolo punto dell'oggetto scansionato viene associata una terna di coordinate x, y, z relative e il valore di intensità del segnale riflesso. Effettuando la scansione dello scenario di interesse secondo angoli solidi, verticale e orizzontale, si ottiene una nuvola di punti della superficie ripresa, dalla cui elaborazione viene generato il modello 3D. L'impiego di una macchina fotografica digitale solidale al laser scanner fornisce l'informazione dei colori reali dell'oggetto (fig. 4).

Tale tecnologia, non invasiva per i monumenti, si dimostra quindi alquanto efficace per finalità di telerilevamento e diagnostica di ambienti naturali ed edificati, in virtù di elevate velocità di scansione, accuratezza e densità spaziale dei punti acquisiti (Arayici, 2007; Yastikli, 2007). Inoltre, come nel presente caso, le attività di rilievo possono essere svolte senza interruzione della fruizione pubblica del sito archeologico.



Fig. 3 - 3A) Il ricetrasmettitore GB-InSAR riceve il segnale radar riflesso dalla superficie monitorata e acquisisce immagini SAR durante lo spostamento lungo il binario. 3B) Per ogni punto della struttura muraria viene misurata la proiezione lungo la LOS (S_{LOS}) dello spostamento reale (S). 3C) Lo strumento GB-InSAR nell'area del Foro Romano durante una fase del rilievo laser scanner 3D; l'area ombreggiata indica la principale scena di ripresa del GB-InSAR (settori N e NO della *Domus Tiberiana* e antistanti monumenti).

55

Risultati del monitoraggio

MISURE PSINSAR

L'analisi interferometrica satellitare sul Colle Palatino e Foro Romano è stata eseguita utilizzando i seguenti *set* di dati radar:

 PS ERS1/2 elaborati da immagini acquisite lungo orbite discendenti tra il 21/04/1992 e il 29/12/2000 e ascendenti tra il 28/04/1993 e l'11/11/2000;

 PS RADARSAT *Fine Beam* elaborati da immagini acquisite lungo orbite ascendenti nel periodo 07/03/2003 - 01/10/2009.

Il ricorso a dataset derivanti da differenti piat-

RESTAURO ARCHEOLOGICO





Fig. 4 - Nuvola di punti 3D, a colori reali, delle *Sostruzioni Adrianee* della *Domus Tiberiana* acquisita mediante rilievo laser scanner terrestre. Fig. 5 - Distribuzione dei PS ERS discendenti (1992-2000) nell'area del Colle Palatino e Foro Romano con le velocità medie di deformazione e l'indicazione delle aree soggette a deformazioni (la numerazione segue il testo). A) Esempio di serie temporale, relativa a un PS nell'area 1), con fasi di incremento della velocità di deformazione (maggio 1995-giugno 1997 e giugno 1998-settembre 2000).

taforme satellitari, diverse geometrie di acquisizione e distinti periodi temporali è stato funzionale a conseguire due principali finalità di indagine.

L'analisi del *dataset* ERS (1992-2000) ha permesso una preliminare ricostruzione delle deformazioni occorse in passato e l'individuazione delle aree storicamente interessate da instabilità.

L'aggiornamento dei dati RADARSAT per il periodo 2003-2009, elaborati con tecnica di dettaglio maggiormente indicata per applicazioni ad alta risoluzione e a scala di sito archeologico (c.d. tecnica *Local*), ha consentito l'analisi dell'evoluzione delle deformazioni superficiali, confermando i settori ad oggi più critici suggerendone una priorità di intervento.

L'elaborazione, ad opera del partner di progetto Tele-Rilevamento Europa - T.R.E. srl, ha fornito:

le velocità medie annue di spostamento dei PS (in mm/anno) misurate lungo la LOS;

 le serie temporali di spostamento di ogni PS (in mm).

Per convenzione i valori di segno negativo delle velocità indicano movimenti in allontanamento rispetto al satellite misurati lungo la LOS; viceversa valori di segno positivo indicano movimenti in avvicinamento.

Dai dati ERS discendenti nel periodo 1992-2000 l'area archeologica è risultata soggetta a diffusi fenomeni di deformazione (per lo più movimenti in allontanamento) con velocità significative per le seguenti aree (fig. 5):

1. *Sostruzioni Adrianee* e settore N della *Domus Tiberiana*;

2. area dell'Aula Domizianea e Santa Maria Antiqua;

3. lato O degli Orti Farnesiani;

4. area a O del Tempio della Magna Mater;

5. settore S del Colle Palatino (area fra la *Casa di Augusto* e il *Tempio di Apollo, Bagni di Livia* e *Museo Palatino, Loggia Mattei* e settore N della *Domus Augustana, Chiesa di Sant'Anastasia* e *Schola Praeconum*);

6. area del Foro Civile.

Le situazioni più critiche sono state riscontrate nelle aree 1 e 2 con andamenti non lineari negli spostamenti e valori massimi di velocità rispettivamente pari a -6,1 e -7,5 mm/anno. La rintracciabilità, all'interno delle serie temporali, di similari andamenti nel tempo delle velocità medie, con alternanza di periodi di relativa stabilità (maggio 1997-giugno 1998) a periodi di incremento della velocità di deformazione (maggio 1995-giugno 1997; giugno 1998-settembre 2000), ha suggerito possibili cause comuni del dissesto e l'occorrenza di fasi di accelerazione dei movimenti (fig. 5A).

Tali dati hanno pertanto evidenziato la necessità di un monitoraggio a scala di monumento delle *Sostruzioni Adrianee* e del settore NO della *Domus Tiberiana* con strumentazione GB-InSAR per verificarne la stabilità strutturale.

L'analisi del *dataset* RADARSAT (2003-2009) ha confermato deformazioni in atto, già rilevate dai dati ERS (1992-2000), nelle seguenti aree (fig. 6):

a. area a O del *Tempio della Magna Mater*;

b. area della *Loggia Mattei* e settore N della *Domus Augustana*;

c. area della *Chiesa di Sant'Anastasia* e *Schola Praeconum*;

d. settore N della Domus Tiberiana;

e. area del Foro Civile.

Le serie temporali dei PS individuati nell'area a) indicano il persistere di deformazioni con velocità massima pari a -3,3 mm/anno e andamenti degli spostamenti non lineari con due fasi di incremento della velocità di deformazione (marzo 2003-febbraio 2004 e febbraio 2009ottobre 2009) (fig. 6A).

Nell'area b) la velocità massima misurata è pari a -2,3 mm/anno, mentre nell'area c) si segnalano movimenti localizzati con velocità massima pari a -2,7 e +3,2 mm/anno.

Sebbene i dati aggiornati al 2009 mostrino una certa stabilizzazione in corrispondenza delle *Sostruzioni Adrianee* laddove i dati ERS indicavano invece elevate velocità di deformazione, l'area d) presenta velocità medie pari a -1,9 mm/anno con fasi di incremento nel periodo novembre 2006-luglio 2008 e valori massimi della velocità pari a -6,7 mm/anno (fig. 6B). Del resto, anche nell'area centrale degli *Orti Farnesiani* sono apprezzabili movimenti localizzati con velocità massima pari a -5,2 mm/anno.

Nel *Foro Romano*, oltre alla conferma di movimenti localizzati nell'area delle *Colonne Onorarie* nel *Foro Civile* con velocità massima pari a -2,3 mm/anno, si segnalano deformazioni nell'area della *Fonte Giuturna* (-2,5 mm/anno) e fra la *Basilica Giulia* e il *Tempio di Saturno* (-2,6 e +2,2 mm/anno).

Nell'area dell'*Arco di Settimio Severo* sono state osservate fasi di incremento della velocità di deformazione nel periodo marzo 2003-agosto 2005, con valore massimo della velocità pari a -6,8 mm/anno.

MISURE GB-INSAR

L'installazione dello strumento GB-InSAR nel Foro Romano ha permesso di centrare la scena di ripresa sulle *Sostruzioni Adrianee* e il settore NO della *Domus Tiberiana* (fig. 3C), ovvero i settori del Colle Palatino risultati soggetti a deformazione dall'analisi preliminare dei dati satellitari ERS (1992-2000). L'acquisizione dei dati è





Fig. 6 - Distribuzione dei PS RADARSAT ascendenti (2003-2009) nell'area del Colle Palatino e Foro Romano con le velocità medie di deformazione e l'indicazione delle aree soggette a deformazioni (la notazione alfabetica segue il testo). A) Nell'area a) sono state individuate fasi di accelerazione nei periodi marzo 2003febbraio 2004 e febbraio 2009-ottobre 2009. B) Anche per l'area d) si segnalano deformazioni con andamenti non lineari degli spostamenti.

Fig. 7 - Integrazione dei dati GB-InSAR con il modello 3D dei monumenti monitorati. Gli spostamenti lungo la

avvenuta in continuo secondo una geometria funzionale al telerilevamento degli spostamenti lungo la LOS dello strumento, permettendo anche una valutazione per gli antistanti monumenti del Foro Romano (*Casa delle Vestali, Tempio dei Dioscuri, Aula Domizianea*). LOS dello strumento sono riportati in falsi colori secondo la scala di fianco riportata (valori di segno positivo indicano movimenti in allontanamento dal sensore). Punti di controllo (punti rossi) sono stati scelti all'interno della scena di ripresa per verifiche puntuali della stabilità strutturale.

RESTAURO ARCHEOLOGICO







Fig. 8 - 8A) Serie temporali dei punti di controllo 3, 4 e 5 (la cui localizzazione è mostrata in Figura 7) che evidenziano una sostanziale stabilità delle *Sostruzioni Adrianee* della *Domus Tiberiana* per il periodo aprile 2009-marzo 2010, ad eccezione di un'anomalia non attribuibile a reali movimenti delle strutture monitorate. 8B) Mappa degli spostamenti occorsi in data 02/03/2010 che evidenzia un'anomalia di spostamento nell'area delle arcate delle *Sostruzioni Adrianee*, rilevata quale movimento repentino rispetto al trend di spostamento all'interno della serie temporale. Ogni singola immagine SAR è stata acquisita con un tempo di scansione pari a circa 6 minuti, mediando, in fase di elaborazione, tali immagini a 8 e 24 ore al fine di ridurre efficacemente alcuni effetti che ne riducono la qualità, come la presenza di fluttuazioni dei parametri atmosferici e il rumore stesso del segnale radar acquisito.

I dati di monitoraggio GB-InSAR sono consistiti in:

mappe degli spostamenti occorsi nelle ultime 24 ore;

mappe degli spostamenti cumulati sull'intero periodo di monitoraggio;

 serie temporali di spostamento per punti di controllo opportunamente scelti nello scenario di ripresa.

Data la tipologia e la cinetica dei fenomeni di deformazione in atto, è stato predisposto un aggiornamento giornaliero dei dati su piattaforma web, permettendo così una loro agevole lettura da parte di qualsiasi utente e un'analisi speditiva dei dati radar preliminare a successive elaborazioni di dettaglio.

L'integrazione dei dati GB-InSAR con il rilievo laser scanner 3D ha portato all'ottenimento di un innovativo prodotto digitale in cui i dati di spostamento sono stati proiettati sul modello 3D della *Domus Tiberiana* (fig. 7). Ne è conseguito quindi un netto miglioramento nell'interpretazione spaziale dei dati GB-InSAR rispetto ai monumenti monitorati, con un'esatta georeferenziazione dei segnali di spostamento nello spazio reale.

58

l dati raccolti nei primi mesi di monitoraggio hanno chiarito l'entità degli spostamenti in atto: ciò ha condotto a definire una soglia minima, al di sotto della quale è possibile considerare una condizione di stabilità relativa, fissata in \pm 0,5 mm di spostamento giornaliero.

All'interno di aree a comportamento omogeneo sono stati selezionati punti di controllo rappresentativi, di cui sono state ricavate e aggiornate giornalmente le serie temporali di spostamento (fig. 7): tale elaborazione è stata finalizzata al rilevamento puntuale di eventuali anomalie nel *trend* di spostamento delle strutture monitorate.

Nel periodo di monitoraggio 21/04/2009-09/03/2010 le *Sostruzioni Adrianee* e il settore NO della *Domus Tiberiana* sono risultati pressoché stabili, lungo la direzione di vista dello strumento (LOS), con spostamenti cumulati che, ad eccezione di un singolo evento anomalo, non hanno superato i valori di +1,5 mm in allontanamento e -0,7 mm in avvicinamento (fig. 8A). L'analisi delle serie temporali ha escluso la presenza di *trend* di spostamento al di fuori della soglia di stabilità.

I punti di controllo scelti per gli altri monumenti non hanno evidenziato spostamenti cumulati superiori a 2,5 mm sia in allontanamento che in avvicinamento. In particolare, gli andamenti degli spostamenti dei punti di controllo per la *Rampa Domizianea, Aula Domizianea* e *Tempio dei Dioscuri* hanno mostrato un'alternanza di fasi di spostamento di segno opposto con una complessiva stabilità per le strutture in esame.

Nel corso del monitoraggio sono state inoltre riscontrate alcune anomalie con spostamenti repentini e circoscritti a determinati settori. Grazie all'analisi delle serie temporali e alla georeferenziazione degli spostamenti rilevati, tali anomalie sono state correttamente attribuite a occasionali attività di cantiere e all'effetto di sondaggi eseguiti mediante carotaggio nelle murature (fig. 8B). Tali risultati dimostrano quindi l'efficacia del monitoraggio GB-InSAR anche come strumento di presidio per la verifica della stabilità strutturale in relazione alla sicurezza sui cantieri.

Nel corso del monitoraggio sono state infine effettuate verifiche dell'eventuale occorrenza di spostamenti a danno delle strutture monitorate in relazione alla sismicità locale. In occasione degli eventi sismici del 12 maggio 2009 e del





Fig. 9 - Area del Tempio della Magna Mater soggetta a deformazioni nel periodo 2003-2009. A-B) Osservazioni in situ hanno evidenziato un alto grado di fratturazione dell'affioramento roccioso di Tufo Lionato, nonché fuoripiombo cedimenti e lesioni nelle strutture murarie soprastanti.

Fig. 10 - Settore N della Domus Tiberiana -Sostruzioni Adrianee. A fronte di deformazioni in atto in aree limitrofe. i dati

23 dicembre 2009, con epicentro nel distretto sismico di Roma, entrambi di magnitudo 2.1, è stata accertata l'assenza di spostamenti rilevabili dal sistema GB-InSAR, fornendo così una valutazione complementare all'attività diagnostica mediante sopralluoghi. di monitoraggio indicano una certa stabilizzazione in corrispondenza delle Sostruzioni Adrianee (A), su cui sono stati eseguiti recenti interventi di consolidamento e restauro lungo la Via Nova.

Identificazione dei settori più critici

Allo scopo di fornire alla Soprintendenza Archeologica di Roma un supporto all'individuazione dei settori più critici cui riservare una priorità di intervento, è stata effettuata un'analisi dei dati di monitoraggio nel quadro dei dati geoarcheologici a disposizione e dell'evidenza a terra riscontrata durante i sopralluoghi.

Le deformazioni superficiali telerilevate da satellite indicano movimenti circoscritti ad aree ben identificabili all'interno del sito archeologico, strettamente correlati alle interazioni fra la tipologia e lo stato di conservazione dei manufatti e i fattori di pericolosità geologica e idrogeologica locali (cavità sotterranee, fratturazione del substrato roccioso, non corretti smaltimento e regimazione delle acque meteoriche e di infiltrazione).

Le stratificazioni antropiche (strutture edificate e riporti) testimoniano fasi costruttive alternate a fasi di abbandono e riuso che hanno determinato l'attuale assetto morfologico con l'interramento di strutture antiche e, all'opposto, la messa in luce di strutture con originaria funzione architettonica e strutturale.

I dati satellitari aggiornati al 2009 identificano come aree più critiche il lato O-SO degli *Orti Farnesiani*, il settore delle pendici SO del Colle Palatino nell'area del *Tempio della Magna Mater* e le aree della *Chiesa di Sant'Anastasia* e della *Loggia Mattei* nel lato S.

Particolare attenzione desta la situazione del lato O-SO del Colle, dove sono occorsi in passato ripetuti crolli e ribaltamenti. Nell'area compresa fra *Porta Romana* e il *Rivellino*, il recente consolidamento del substrato roccioso si è reso indispensabile a causa del quasi totale distacco di blocchi tufacei dall'affioramento retrostante.

Le deformazioni rilevate da satellite già dal 1992 nel settore del *Tempio della Magna Mater* trovano riscontro nei fuoripiombo e nelle lesioni delle strutture murarie soprastanti l'affioramento geologico del *Tufo Lionato*, estremamente fratturato (fig. 9A-B). Tali evidenze suggeriscono quindi la necessità di approntare adeguati interventi di consolidamento, al fine di consentire nuovamente la fruizione pubblica del monumento.

Particolarmente interessante è quanto emerso dall'analisi integrata dei dati di monitoraggio PSInSAR e GB-InSAR per la *Domus Tiberiana*, la cui vicenda conservativa è alquanto esemplificativa, essendo oggi una struttura completamente a vista e priva dell'originaria azione di controspinta del terreno di costipamento rimosso dagli scavi archeologici fra XIX e XX secolo.

La stabilizzazione in corrispondenza delle *Sostruzioni Adrianee* dedotta dal confronto dei *dataset* ERS e RADARSAT potrebbe essere messa in relazione ai recenti interventi, eseguiti dalla Soprintendenza, di ricostruzione delle arcate e di consolidamento delle strutture delle *Tabernae* lungo la Via Nova (fig. 10A). Del resto, anche i dati GB-InSAR nel periodo aprile 2009-marzo 2010 attestano l'assenza di spostamenti lungo la LOS dello strumento al di fuori della soglia di stabilità (fig. 8A).

Tali dati evidenziano l'opportunità di proseguire nell'attività di restauro nel settore N della *Domus Tiberiana*, intervenendo anche nelle immediate adiacenze e nell'area degli *Orti Farnesiani*, laddove i dati RADARSAT (2003-2009) mostrano localizzati movimenti di deformazione (fig. 10).

Conclusioni

Il monitoraggio radar svolto dal Dipartimento di Scienze della Terra per il Colle Palatino e il Foro Romano si è rivelato un valido supporto scientifico-tecnologico alle attività del Commissario delegato per l'area archeologica di Roma, attraverso l'innovativa applicazione integrata di tecniche radar interferometriche da satellite e con strumentazione basata a terra.

L'analisi dei dati satellitari aggiornati al 2009 ha chiarito che le deformazioni superficiali in atto sono per lo più fenomeni localizzati, connessi a fattori di pericolosità geologica e idrogeologica che richiedono interventi mirati all'interno di un più ampio progetto organico di restauri e consolidamenti.

Le aree più critiche sono risultate il lato O-SO del Colle Palatino, il settore del *Tempio della Magna Mater*, il settore S nelle aree della *Chiesa di Sant'Anastasia* e della *Loggia Mattei*.

La relativa stabilità osservata nel periodo di monitoraggio per i settori N e NO della *Domus Tiberiana* trova riscontro nei recenti interventi di consolidamento effettuati dalla Soprintendenza Archeologica di Roma e conferma la necessità di procedere con la messa in sicurezza delle aree instabili, attraverso anche il supporto di costanti attività di monitoraggio delle strutture.

I risultati di questa applicazione dimostrano

quindi le potenzialità delle tecniche di interferometria radar, da satellite e da terra, per attività di telerilevamento, monitoraggio e caratterizzazione spaziale e temporale di fenomeni di instabilità a danno di strutture archeologiche e monumenti. In particolare, l'aggiornamento mensile delle serie storiche di deformazione conseguibile per mezzo delle acquisizioni da piattaforma satellitare permette il monitoraggio di eventi deformativi con velocità medie di deformazione fino a 10-15 mm/anno, con risoluzioni a terra nell'ordine della decina di metri. Una parallela attività di monitoraggio terrestre, in virtù dell'alta frequenza di campionamento (fino a pochi minuti per ogni immagine), configura la possibilità di allertamenti rapidi in situazioni di cedimenti strutturali improvvisi e di fasi di accelerazione nel *trend* deformativo, consentendo attività provvisionali in tempo quasi-reale. A queste funzionalità si aggiunge la non invasività di queste tecniche, che prevede la totale eliminazione dell'impatto diretto delle attività diagnostiche sulle strutture archeologiche monitorate, prefigurando future applicazioni in contesti similari.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano l'architetto Pia Petrangeli e la Soprintendenza Archeologica di Roma per il supporto alle attività di monitoraggio, nonché Tele-Rilevamento Europa - T.R.E. srl e Ellegi srl - LiSALab per l'elaborazione dei dati di monitoraggio.

Bibliografia

Antonello G., Casagli N., Farina P., Leva D.,

Nico G., Sieber A.J., Tarchi D. (2004). *Ground-based SAR interferometry for monitoring mass movements.* "Landslides" 1 (1), 21-28.

Arayici Y. (2007). An approach for real world data modelling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment. "Automat. Constr." 16, 816-829.

Casagli N., Catani F., Del Ventisette C., Luzi G. (2010). *Monitoring, prediction and early-warning using ground-based radar interferometry.* "Landslides" 7 (3), 291-301.

Cigna F., Del Ventisette C., Liguori V., Casagli N. (2011). Advanced radar-interpretation of InSAR time series for mapping and characterization of geological processes. "Nat. Hazards Earth Syst.

Sci." 11 (3), 865-881.

Colesanti C., Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2003). *Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique*. "Eng. Geol." 68, 3-14.

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

Gigli G., Mugnai F., Leoni L., Casagli N. (2009). Analysis of deformations in historic urban areas using terrestrial laser scanning. "Nat. Hazards Earth Syst. Sci." 9, 1759-1761.

Yastikli N. (2007). Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. "J. Cult. Herit." 8 (4), 423-427.



61

riproduzione vietata - © 2012 NARDINI EDITORE - riproduzione vietata - © 2012 NARDINI EDI