

## APPLICAZIONI GIS E DI REMOTE SENSING SATELLITARE PER LA CONOSCENZA E IL MONITORAGGIO DELL'AREA URBANA DI *FALERII NOVI* E DEL TERRITORIO CIRCOSTANTE

### 1. INTRODUZIONE

Il presente studio espone alcuni dei risultati ottenuti applicando le metodologie di indagine legate all'analisi, all'elaborazione e all'interpretazione delle immagini satellitari ad alta risoluzione per lo studio e il monitoraggio della città romana di *Falerii Novi* e del territorio circostante. Tali indagini sono state svolte nell'ambito di un dottorato di ricerca finanziato dal progetto europeo CLIMA (Cultural Landscape risk Identification, Management and Assessment), dal carattere interdisciplinare e il cui scopo è stato quello di sviluppare un webGIS funzionale alle politiche di pianificazione per la conservazione e il monitoraggio del patrimonio archeologico danneggiato dalle attività agricole, relativamente ad alcuni casi studio, tra i quali appunto *Falerii Novi* (DE ANGELI, BATTISTIN 2020)<sup>1</sup>.

L'area urbana e il suburbio della città di *Falerii Novi* ricadono oggi in un territorio principalmente deputato alle lavorazioni agricole, coltivato per lo più a seminativo, con limitate aree boschive che ricoprono le profonde valli scavate dai corsi d'acqua. Si tratta di un contesto paesaggistico in continua evoluzione, adatto ad un tipo di ricerca di dettaglio basata su tecniche di indagine non invasive, che da una parte garantiscono le regolari attività di conduzione del terreno e dall'altra consentono di valutare e monitorare l'impatto che queste lavorazioni hanno sui resti antichi sepolti.

Per questo motivo, traendo spunto dai fruttuosi risultati ottenuti per questo sito grazie all'esame di alcune fotografie aeree storiche (SCARDOZZI 2003, 2004) e recenti (MASTROIANNI 2016), dei dati LIDAR (OPITZ 2009) e, in particolare, grazie alle campagne di prospezioni geofisiche condotte a più riprese nel 1997-1998 (KEAY *et al.* 2000), nel 2007-2008 (HAY *et al.* 2010) e più recentemente a partire dal 2015 (VERDONCK *et al.* 2020), che hanno consentito di ricostruire una planimetria dettagliata dell'area urbana e del suburbio, si è ritenuto importante allargare il campo di indagine ad altri strumenti di remote sensing non ancora utilizzati, come le immagini satellitari ottiche ad alta risoluzione.

<sup>1</sup> Sul progetto CLIMA, coordinato dall'Università della Tuscia sotto la direzione del Prof. Stefano De Angeli, cfr. <http://www.clima-project.eu/>. Il dottorato è stato svolto presso il Dipartimento di Studi Linguistico-Letterari, Storico-Filosofici e Giuridici dell'Università della Tuscia. Le attività di ricerca sono state svolte presso il Laboratorio di Topografia Antica, Archeologia e Telerilevamento dell'Istituto per il Beni Archeologici e Monumentali del CNR, oggi Archaeological Mapping Lab dell'Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale.

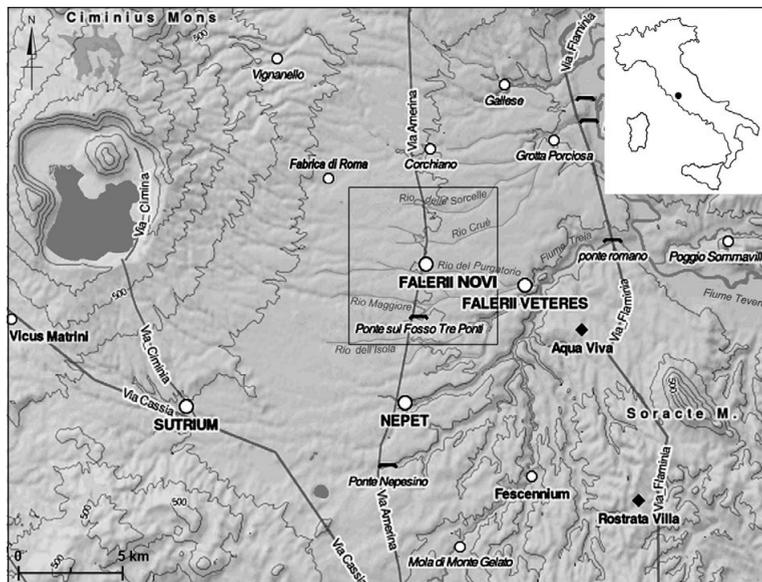


Fig. 1 – *Falerii Novi* e il territorio circostante al centro dell’agro falisco (rielaborazione della mappa tratta da <https://imperium.ahlfeldt.se/>).

Nello specifico, la ricerca si è basata sull’applicazione di tecniche di image processing su cinque immagini satellitari ad alta risoluzione, allo scopo di identificare tracce e altre anomalie archeologiche, attraverso l’enfaticizzazione delle caratteristiche spettrali, spaziali e radiometriche dei dati da remoto. La fase di fotointerpretazione è stata necessariamente supportata dallo spoglio delle fonti bibliografiche disponibili per il territorio in esame, e validata, dove possibile, da verifiche sul campo. Tali attività si sono successivamente tradotte nella produzione di una cartografia tematica, mediante la vettorializzazione e la classificazione in ambiente GIS delle tracce osservate.

*Falerii Novi*, situata nel territorio dell’attuale Fabrice di Roma (VT), fu fondata dai Romani nel 241/240 a.C., all’indomani della conquista dell’agro falisco, nel territorio ad O di *Falerii Veteres*-Civita Castellana (Fig. 1). Contestualmente alla fondazione della nuova città, venne costruita la via Amerina, l’asse stradale che, sfruttando in parte la viabilità preesistente, aveva lo scopo di garantire un più rapido collegamento tra Roma e l’Umbria (FREDERIKSEN, WARD-PERKINS 1957; DI STEFANO MANZELLA 1979, 1990; DE LUCIA BROLLI 1991; DE ANGELI 2017). *Falerii Novi* occupava un territorio pianeggiante, inciso dalle valli che drenavano l’acqua verso il fiume Treia a E, e quindi particolarmente vantaggioso per lo sfruttamento agricolo e la sistemazione di pascoli per l’allevamento.

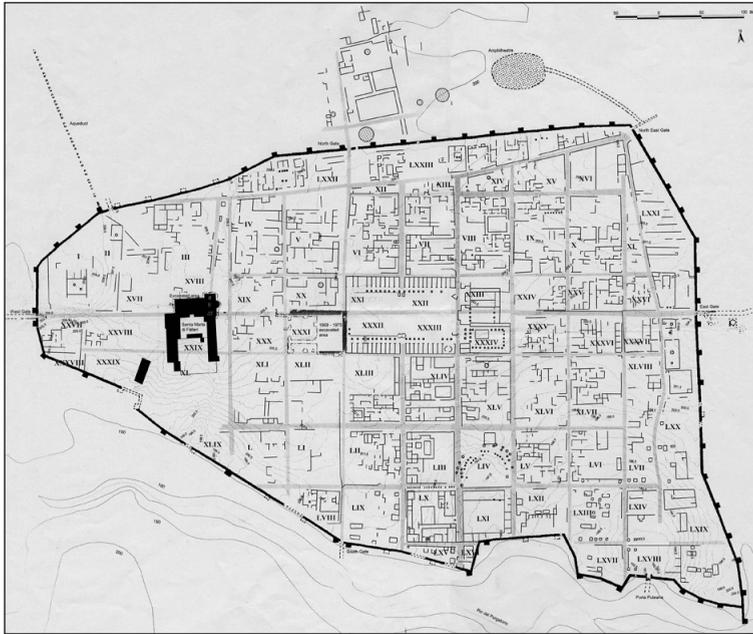


Fig. 2 – Planimetria della città di *Falerii Novi* elaborata sulla base delle proiezioni geofisiche condotte tra il 1997 e il 1998 (KEAY *et al.* 2000, fig. 7).

I resti archeologici oggi maggiormente evidenti sono costituiti dalla cinta muraria in tufo rosso che, con un'altezza conservatasi di circa 6 m, delimita un'area di circa 30 ha, lambita a S dalla valle del Rio Purgatorio. Altre strutture visibili sono quelle pertinenti al settore dell'isolato scavato nei primi anni Settanta dalla Soprintendenza Archeologica in un'area al centro della città (DE LUCIA BROLLI 1991), subito ad E della chiesa romanica di Santa Maria in Falleri; parte delle strutture del teatro e di altri limitati settori urbani, invece, furono messi in luce dai pesanti sterri ottocenteschi, per poi essere successivamente ricoperti (DI STEFANO MANZELLA 1979). Per il resto, tutto ciò che si conosce sulla struttura urbanistica della città è dato dai risultati delle prospezioni geofisiche, a partire dalla prima planimetria pubblicata nel 2000 (Fig. 2).

## 2. STRUMENTI E METODI

### 2.1 Selezione dei dati

Per testare le potenzialità del remote sensing sul sito di *Falerii Novi* sono state utilizzate cinque immagini satellitari ad alta risoluzione che riprendono

Satellite	ID immagine	Data di acquisizione	Ora di acquisizione	Risoluzione spaziale	Risoluzione spettrale	Angolo di off-nadir	Angolo di elevazione solare
QuickBird-2	1010010002036200	24/06/2003	09:52:35	0,62 m (PAN) 2,44 m (MS)	4 bande	7,34°	64,78°
GeoEye-1	1050410001B38400	18/07/2010	10:01:56	0,50 m (PAN) 2 m (MS)	4 bande	21,39°	63,45°
WorldView-2	1030050010F9BD00	12/07/2011	10:38:21	0,50 m (PAN) 2 m (MS)	8 bande	14°	64°
GeoEye-1	10504100027B3200	06/07/2013	17:30:45	0,50 m (PAN) 2 m (MS)	4 bande	26,02°	64°
WorldView-2	103001003A214300	10/12/2014	10:06:42	0,50 m (PAN) 2 m (MS)	8 bande	22,65°	22,92°

Tab. 1 – Tabella sintetica delle immagini satellitari utilizzate e delle relative caratteristiche.

il territorio in esame nell’arco di poco più di un decennio: si tratta, nello specifico, di un’immagine QuickBird-2 del 2003, una GeoEye-1 del 2010, una WorldView-2 del 2011, una GeoEye-1 del 2013 e una WorldView-2 del 2014 (Tab. 1).

La scelta delle immagini è stata dettata dalla necessità di esaminare il differente stato dei campi in periodi e anni diversi e di valutare la performance dei vari sensori nel registrare l’energia elettromagnetica riflessa dalla superficie del suolo. Alla base di questi criteri si è naturalmente tenuto conto di quelle peculiari proprietà delle immagini satellitari che sono imprescindibili per una lettura del territorio finalizzata propriamente all’indagine archeologica (SCARDOZZI 2016). Tali caratteristiche sono:

- la “risoluzione geometrica (o spaziale)”, che si riferisce alle dimensioni al suolo del pixel contenente il valore della radiazione elettromagnetica riflessa (pertanto, maggiore è la risoluzione geometrica, maggiore sarà anche la capacità di discriminare gli oggetti presenti sulla superficie terrestre); nel caso in oggetto, le immagini selezionate offrono una risoluzione geometrica compresa tra 50 e 60 cm;
- la “risoluzione spettrale”, data dal numero delle bande spettrali registrate dal sensore. Oltre alla singola banda dell’immagine pancromatica (in toni di grigio - PAN), il numero delle bande di una immagine multispettrale può invece variare da un minimo di 4 ad un massimo di 10, consentendo di osservare la superficie terrestre anche nelle porzioni dello spettro elettromagnetico non visibili. In questa ricerca si è preferito utilizzare una risoluzione spettrale a 4 bande (banda 1: Blu, banda 2: Verde, banda 3: Rosso, e banda 4: Vicino Infrarosso - NIR) che può ritenersi già sufficiente per l’identificazione delle tracce archeologiche, poiché sono inclusi il canale del Rosso e il canale non visibile del Vicino Infrarosso, ovvero quelli che più degli altri rispondono meglio ai fattori di mediazione delle tracce, come umidità e vegetazione;

- la “data di acquisizione”, che è importante per poter scegliere le immagini acquisite nei periodi dell’anno che offrono le migliori condizioni di visibilità del suolo agricolo e delle tracce archeologiche che si manifestano in superficie;
- l’“angolo di off-nadir”, che rappresenta la posizione e l’inclinazione del sensore rispetto alla superficie terrestre durante l’acquisizione della scena; tanto più il nadir è vicino ad una verticale, tanto meno l’immagine avrà distorsioni geometriche. Anche questo rappresenta chiaramente un aspetto determinante per la scelta delle immagini da utilizzare nell’ambito di uno studio archeologico di dettaglio e a grande scala, soprattutto se mirato alla restituzione grafica puntuale di alcuni elementi;
- l’“angolo di elevazione solare”, che rappresenta l’altezza del Sole sull’orizzonte al momento dell’acquisizione satellitare, fattore che influenza il tipo di illuminazione che caratterizza l’immagine. Ne consegue, per esempio, che un angolo di elevazione basso determinerà la presenza di luce radente, molto utile nell’identificazione di microrilievi prodotti dalla presenza di strutture sepolte.

Pertanto, un’attenta valutazione dei fattori appena descritti e una discreta conoscenza del ciclo vegetativo dei campi dell’area di indagine rappresentano presupposti fondamentali per questo tipo di ricerca, poiché indirizzano nella scelta delle immagini più adatte agli scopi richiesti.

## *2.2 Processing dei dati*

Dopo una iniziale ispezione visuale e ancor prima di essere utilizzate in ambiente GIS nella fase di analisi e restituzione grafica delle anomalie osservate, le immagini satellitari scelte sono state sottoposte a una sequenza di elaborazioni, allo scopo di estrarre la maggior quantità di informazioni possibili utili all’indagine archeologica. Tali elaborazioni, consistenti in varie tecniche di enhancement, intervengono sulle particolari proprietà delle immagini, migliorando la leggibilità di possibili tracce archeologiche, enfatizzandone le caratteristiche e agevolando il processo di fotointerpretazione dell’intera scena. Le varie catene di processing sperimentate nel presente studio sono state applicate utilizzando il software proprietario ENVI 4.7 e si sono basate sulle metodologie di remote sensing più performanti nel campo di applicazione archeologico (CAMPANA 2004; LASAPONARA, MASINI 2012).

Per le finalità della presente ricerca si è scelto di testare tutte le categorie note in cui si suddividono le tecniche di miglioramento delle immagini. Sono state pertanto applicate le tecniche di miglioramento radiometrico e spaziale, attraverso il contrast stretching e il convolution filter, perché hanno migliorato la leggibilità della scena, agevolando la percezione anche di piccoli dettagli e di lievi differenze di tono. Per il miglioramento spettrale è stato applicato il calcolo dell’Indice di vegetazione NDVI su tutte e cinque le immagini disponibili che, enfatizzando la differente risposta spettrale della vegetazione nelle

varie bande, ha evidenziato maggiormente le tracce archeologiche legate alla presenza nel sottosuolo di strutture murarie, crolli o anche cavità, fossati, trincee, etc.

In alcune immagini multispettrali, per migliorare ulteriormente la discriminazione di pixel con valori simili di riflettanza e minimizzare il “rumore” dato dall’elevata correlazione positiva tra le diverse bande, si è scelto di applicare la Principal Component Analysis. Dal punto di vista matematico consiste in una trasformazione lineare che decorrela i dati multispettrali attraverso la traslazione e/o rotazione degli assi dello spazio originale in un nuovo sistema spaziale (DAINELLI 2011). Da questa trasformazione si ottengono, in pratica, nuove immagini decorrelate tra loro (denominate “componenti principali”), pari al numero dei canali processati, che consentono di discriminare meglio i dettagli di alcuni oggetti rappresentati, in quanto i pixel spettralmente simili delle bande originali si trovano più distanziati in quelle nuove. Queste ultime bande non rappresentano più il valore fisico originale (cioè la radianza), ma un valore artificialmente calcolato e ponderato sui nuovi assi di riferimento.

Quindi, ad esempio, l’applicazione della PCA a un’immagine multispettrale, costituita dalle quattro bande originali del Blu, del Verde, del Rosso e del Vicino Infrarosso, genera quattro nuove immagini, in ordine crescente di varianza, che assumono valori maggiori rispetto a quella delle bande originali. Da questi prodotti della trasformazione sono state utilizzate le prime due bande ottenute (la PCA1 e la PCA2). La prima (PC1) è quella che contiene la maggior parte delle informazioni, in quanto è il risultato della somma di tutte le bande, ciascuna con un peso proporzionale al grado di originalità dell’informazione in essa contenuta. La seconda (PC2) rappresenta il valore assoluto del discostamento in termini di riflettanza di ogni pixel rispetto all’asse della PC1 e quindi ha una varianza molto minore. La terza e la quarta rappresentano sostanzialmente elementi di rumore. In aggiunta alle tecniche di miglioramento qualitativo e quantitativo sono state applicate anche le consuete operazioni di data fusion, che consentono di combinare i dati satellitari aventi risoluzioni e contenuti informativi differenti, cioè l’immagine pancromatica con l’immagine multispettrale, in un’unica immagine pan-sharpened. La cosiddetta “trasformazione Gram Schmidt” è la tecnica di data fusion che si è scelto di applicare alle immagini selezionate.

### 2.3 Gestione dei dati nella piattaforma GIS

I dati sintetici georiferiti risultanti dal processing delle immagini sono stati inseriti come file raster (.geotiff) nel progetto GIS dedicato per essere ulteriormente esaminati in rapporto agli altri strati informativi della piattaforma, ovvero, il livello dei dati bibliografici (i punti dei rinvenimenti archeologici con annesse descrizioni), il livello della cartografia storica (raster georeferenziati manualmente) e moderna (ottenuta attraverso il caricamento di WMS-Web

Map Service), il livello degli altri dati telerilevati (foto aeree storiche georeferenziate manualmente e ortofoto recenti caricate come WMS) e infine il livello in cui sono state caricate le time-slice delle recenti prospezioni GPR che hanno interessato l'area urbana<sup>2</sup>. Parallelamente alla lettura integrata delle immagini processate e alla fotointerpretazione si è proceduto quindi alla vettorializzazione di tutti quegli elementi ritenuti di natura archeologica confluiti nel livello "Tracce archeologiche". A ciascuna feature è stata associata una scheda attributi contenente le informazioni relative alla traccia digitalizzata.

Tale scheda attributi, appositamente modulata per le finalità ultime di conoscenza e monitoraggio da remoto dell'area indagata, si caratterizza da una parte descrittiva e una parte interpretativa: la prima contiene le informazioni oggettive, come dimensioni, forma e tipologia della traccia (da vegetazione, da umidità, da alterazione della composizione del terreno o da microrilievo) oltre che le informazioni di base riguardanti le immagini satellitari da cui è stato ricavato il dato oggetto della fotointerpretazione; nella seconda parte della scheda la traccia viene esaminata in relazione ai dati bibliografici e archeologici di contesto e, dove possibile, è integrata con i dati raccolti dalle verifiche sul campo.

### 3. RISULTATI

I risultati ottenuti dall'esame integrato dei dati archeologici noti e dei dati satellitari, opportunamente elaborati seguendo precise catene di processamento, sono di seguito presentati nel dettaglio e suddivisi per ciascuna immagine satellitare. Nei commenti relativi alla localizzazione delle anomalie e alle tracce riscontrate all'interno dell'area urbana si è fatto riferimento alle denominazioni convenzionali delle insule utilizzate nella prima planimetria redatta a seguito delle prospezioni geofisiche condotte nell'area tra il 1997 e il 1998 (Fig. 2).

#### 3.1 Immagine satellitare *QuickBird-2 del 2003*

L'esame visuale dell'immagine pancromatica e di quella multispettrale a colori reali relative all'area interna e immediatamente esterna alla cinta muraria di *Falerii Novi* non ha messo in evidenza tracce di rilievo (Fig. 3, A). Tuttavia, la composizione in falsi colori nella sequenza delle bande 4-3-2 ha rivelato delle anomalie (Fig. 3, B), non necessariamente indicative della presenza di strutture interrato, ma interessanti per la comprensione dei processi di erosione e deposizione del suolo superficiale (e con esso degli

<sup>2</sup> I risultati delle prospezioni sono integralmente disponibili come file raster georiferiti e scaricabili gratuitamente dal portale Archaeology Data Service [https://archaeologydataservice.ac.uk/archives/view/romancities\\_ahrc\\_2019/](https://archaeologydataservice.ac.uk/archives/view/romancities_ahrc_2019/).

strati archeologici più esposti) in rapporto all'orografia dell'area urbana. Il successivo calcolo dell'indice NDVI ha enfatizzato ancora di più le differenti condizioni del suolo.

Così, nell'angolo nord-occidentale dell'area urbana, il settore di campo corrispondente alle *insulae* II, III, XVII e XVIII (Fig. 3, B, area 1) presenta

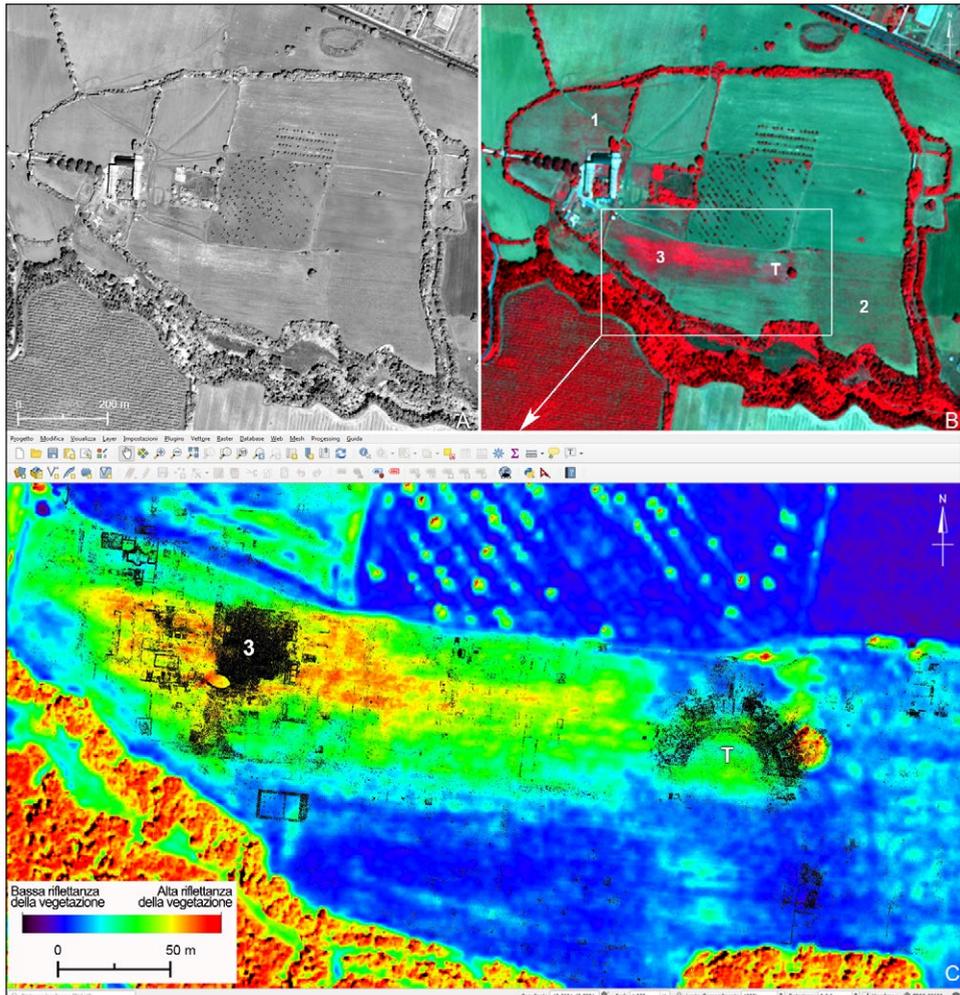


Fig. 3 – Area urbana di *Falerii Novi*. Differenze di visualizzazione tra l'immagine pancromatica (A) e l'immagine multispettrale in falsi colori (B) della QuickBird-2 del 2003. C) Schermata GIS con visualizzazione integrata del prodotto NDVI (mappa di colori "rainbow") e delle strutture individuate dalle prospezioni GPR (anomalie in nero: da VERDONCK *et al.* 2020, fig. 4; "Falerii Novi\_field 4" time slices da 13-14 ns a 23-24 ns - Archaeology Data Service [https://archaeologydataservice.ac.uk/archives/view/romancities\\_ahrc\\_2019/](https://archaeologydataservice.ac.uk/archives/view/romancities_ahrc_2019/)).

una vegetazione superficiale leggermente più rigogliosa rispetto al settore occidentale dello stesso campo, corrispondente al punto più elevato della città (*insula* I). Questa condizione potrebbe imputarsi al fatto che i continui lavori di aratura e dissodamento del terreno hanno contribuito al fenomeno di erosione superficiale dei suoli posti a quote maggiori e al conseguente dilavamento di consistenti masse di terreno verso le aree più basse, che accolgono strati di *humus* sempre più spessi e percentuali maggiori di umidità con crescita più fitta della vegetazione. Stesse osservazioni possono essere dedotte per gli isolati posti nella parte più bassa della città, ovvero nel settore sud-orientale, anch'esso posto a quote inferiori rispetto ai terreni immediatamente circostanti (Fig. 3, B, area 2).

Una fortissima risposta spettrale soprattutto nella banda del Vicino Infrarosso, resa molto evidente tramite l'applicazione dell'indice NDVI, caratterizza invece il settore centro-meridionale della città, corrispondente alle *insulae* L, LI, LII e LIII. Grazie alla possibilità offerta dal GIS di integrare questi prodotti di processing con le cartografie storiche e con la recente planimetria elaborata a seguito delle ultime prospezioni GPR condotte sul sito (Fig. 3, C), si possono proporre alcune ipotesi sulla natura, solo apparentemente casuale, delle tracce osservate. L'eccessiva crescita rigogliosa della vegetazione (in particolare nelle *insulae* L e LI) può essere indicativa, in questo caso, del maggiore livello di erosione in cui versano gli strati archeologici di quest'area, che sappiamo essere stata oggetto di pesanti sterri tra il 1822 e il 1823 (DI STEFANO MANZELLA 1979) e che infatti nei risultati delle prospezioni geofisiche, accanto alle strutture meglio interpretabili (ad es. quelle pertinenti al complesso termale), restituisce anche dati con una forte componente di "rumore" imputabile forse ai crolli e alle macerie delle strutture antiche più superficiali (Fig. 3, C, n. 3) (VERDONCK *et al.* 2020, fig. 4, n. 5). Anche l'isolato occupato dalle strutture sepolte del teatro (LIV), oggi corrispondente a una depressione morfologica apprezzabile solo sul terreno, appare interessato da una crescita differenziata della vegetazione, che infatti si presenta più fitta solo in corrispondenza dell'interro che copre l'area dell'orchestra e i livelli inferiori della *cavea* (Fig. 3, C, "T").

### 3.2 Immagine satellitare GeoEye-1 del 2010

L'immagine in oggetto (così come le successive WorldView-2 del 2011 e GeoEye-1 del 2013 acquisite anch'esse nel mese di luglio) offre la possibilità di esaminare significative tracce da vegetazione, di natura archeologica, che si concentrano sul pianoro di Casa De Feno, posta nell'immediata area suburbana meridionale di *Falerii Novi* e subito a E della via Amerina; si tratta delle stesse tracce già individuate nell'ambito di un recente studio di fotointerpretazione delle riprese aeree e satellitari visualizzabili gratuitamente nel Portale Cartografico della Regione Lazio, nel portale e-Geos e in Google Earth

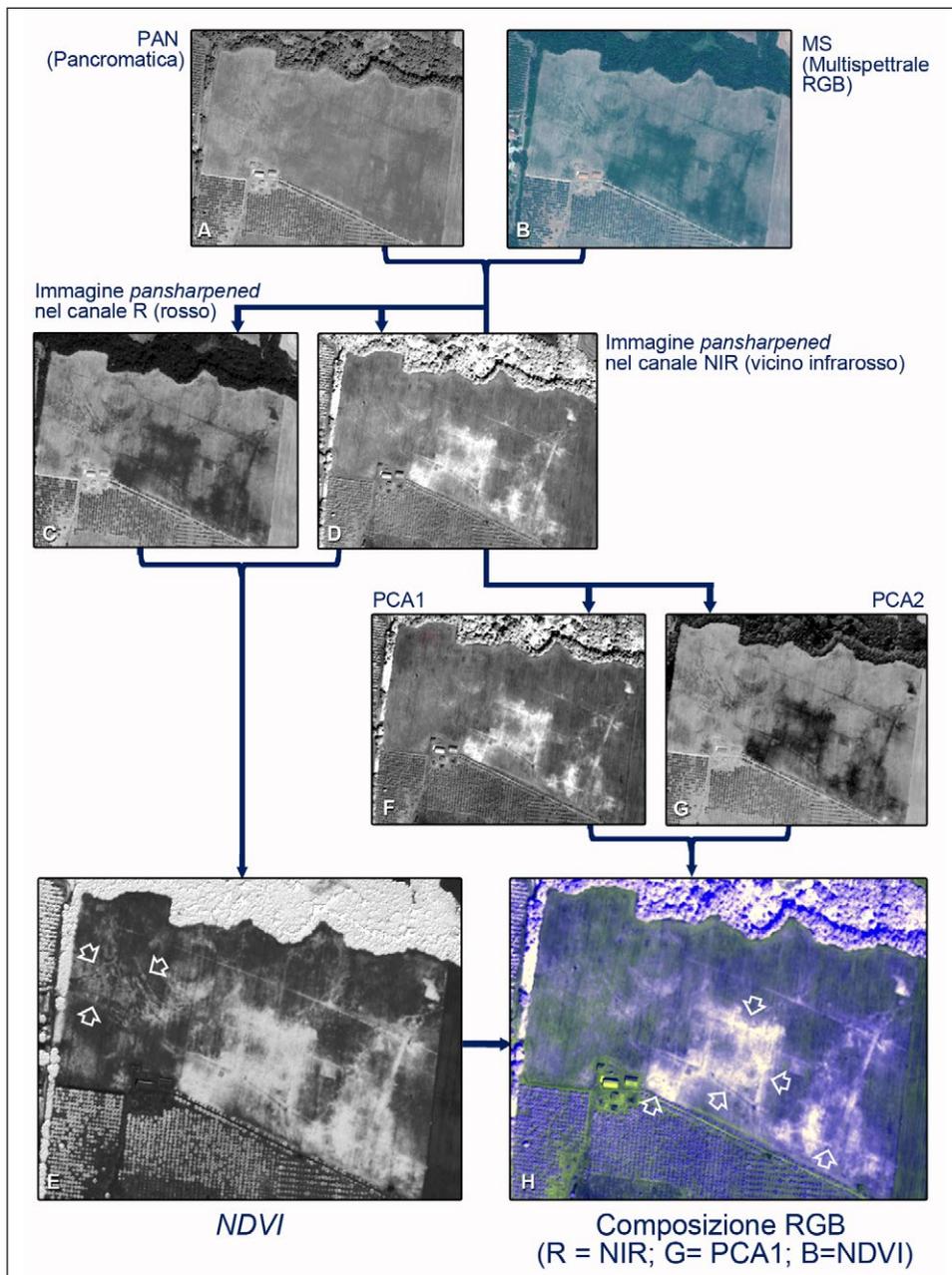


Fig. 4 – Schema delle varie fasi di processing applicate ai dati satellitari con dettagli del suburbio meridionale di *Falerii Novi* dell'immagine GeoEye-1 del 2010.

(MASTROIANNI 2016). In questo studio viene posta attenzione sulle tracce di due assi viari, molto vicini, che attraversano il pianoro in senso E-O, relativi a tratti della via di epoca falisca, riutilizzata in epoca medievale, che collegava la città di Sutri con *Falerii Veteres* (poi Civita Castellana); nella stessa area sono state osservate ulteriori tracce da vegetazione, di cui notevoli sono quelle interpretate come pertinenti a due ville rustiche prospicienti l'asse stradale antico, una più grande a N e una più piccola a S.

Nell'immagine satellitare selezionata, la copertura non omogenea della vegetazione in un campo destinato a pascolo e già interessato dalla falciatura del fieno è da imputarsi evidentemente alla crescita di graminacee spontanee a seguito di copiose piogge che hanno reso il suolo abbastanza umido da favorire anche a luglio lo sviluppo rigoglioso e differenziato di nuova vegetazione. Da una prima analisi visiva di ciascuna banda emerge che tali anomalie sono poco o per niente visibili nel canale del pancromatico (Fig. 4, A), meglio identificabili nel canale del Rosso (Fig. 4, C), ma maggiormente discriminabili nel canale del Vicino Infrarosso, attraverso cui la separabilità spettrale fra le tracce e il loro immediato intorno è più accentuata (Fig. 4, D). È stato quindi calcolato l'indice NDVI, che però non ha restituito risultati soddisfacenti: la parte centrale del campo, dove si concentrano le tracce, risente ancora molto della forte riflettanza della vegetazione nel canale del Vicino Infrarosso, che in alcuni punti diventa tanto eccessiva da rendere alcune aree sature e poco discriminabili.

Con questo risultato, tuttavia, una migliore leggibilità delle anomalie sembra interessare solo il settore più occidentale del campo, a ridosso della via Amerina, dove sembrano identificarsi tracce relative a sentieri che si diramano dal tracciato viario principale che attraversa il pianoro in senso E-O (Fig. 4, E) e interpretato come la strada che collegava Sutri con *Falerii Veteres*. Rispetto al NDVI, la scelta della Principal Component Analysis, applicata per minimizzare la ridondanza di informazione in alcune aree, è parsa più performante e, come previsto, tra le quattro nuove bande ottenute da questa trasformazione le migliori sono risultate la PCA1 e soprattutto la PCA2 (Fig. 4, F-G). A questo punto, sono stati effettuati alcuni tentativi di combinazione dei prodotti ottenuti dalle singole tecniche di enhancement in una composizione in falsi colori; questa operazione non ha migliorato di molto l'analisi delle anomalie, ma ha restituito complessivamente una percezione più immediata degli elementi presenti in traccia all'interno dell'area di interesse (Fig. 4, H).

La lettura delle immagini risultanti dalle elaborazioni, la conoscenza del contesto archeologico noto e delle caratteristiche geomorfologiche del pianoro esaminato hanno permesso di riconoscere in traccia la forma di più ambienti, che sembrerebbero appartenere ai due edifici prima citati. Tuttavia la visibilità e la distribuzione delle tracce in due nuclei distinti ma contigui potrebbero essere state condizionate dal differente grado di erosione superficiale dell'intero campo, che proprio in corrispondenza di

quelle due aree presenta le quote maggiori, e non si esclude per questo che esse possano verosimilmente appartenere ad un'unica villa rustica, delle dimensioni indicative di 230×118 m, e che la strada visibile in traccia si riferisca a un tracciato solo successivo alla fase di occupazione della villa. La presenza di una fattoria o una villa rustica suburbana è già nota nelle fonti bibliografiche: sino alla fine dell'Ottocento i resti *in situ* di un «rudero di fondamento quadrato a bozze di tufo» erano infatti ancora visibili esattamente in questo punto (GAMURRINI *et al.* 1972, fig. 274, n. 96), mentre, più di mezzo secolo dopo, Ward-Perkins identificò il sito con una fattoria romana sulla base esclusivamente della dispersione del materiale ceramico osservato a ridosso del casale moderno (FREDERIKSEN, WARD-PERKINS 1957, fig. 10). Tra il 1968 e il 1975, numerose sono le segnalazioni fatte alla Soprintendenza Archeologica dell'Etruria Meridionale a seguito di scavi clandestini nell'area, che hanno portato alla luce sarcofagi e resti di strutture di cui non esiste però alcuna documentazione grafica (BRUNETTI NARDI 1972, 1981); inoltre, materiale ceramico antico sparso sul pianoro è stato osservato anche negli ultimi sopralluoghi della Soprintendenza (DE LUCIA BROLLI, BIELLA, SUARIA 2012).

### 3.3 Immagine satellitare WorldView-2 del 2011

Anche questa immagine satellitare è stata acquisita in pieno periodo estivo e successivamente a giorni piovosi, motivo per cui le buone condizioni di visibilità hanno permesso di individuare alcune tracce archeologiche che erano state già identificate per mezzo delle elaborazioni dell'immagine GeoEye-1 del 2010. È stato seguito perciò lo stesso flowchart di elaborazione dei dati (fusione dei dati PAN e multispettrali, calcolo dell'indice NDVI e combinazione dei vari prodotti di data fusion) che ha consentito di ricavare informazioni spaziali più accurate sulla forma e sull'estensione delle anomalie.

Relativamente alle tracce individuate nel suburbio meridionale, il data fusion dell'elaborazione NDVI (Fig. 5, C) con la banda PAN (Fig. 5, A) e la banda del NIR (Fig. 5, B) ha prodotto una immagine in falsi colori in cui sono ancora più enfatizzate le anomalie e meglio definita la forma degli ambienti caratterizzanti l'edificio (Fig. 5, D). Dall'integrazione del dato satellitare con le informazioni cartografiche della piattaforma GIS si nota che il nucleo più cospicuo di tracce coincide con il settore del campo posto a quota maggiore. Evidentemente le arature hanno già intaccato in maniera consistente gli strati archeologici superficiali, distruggendo, frantumando e disperdendo i resti delle strutture murarie su tutto il pianoro.

A N della città, invece, nell'area di Casale Quartaccio, proprio nello stesso campo in cui alla fine degli anni '50 Ward-Perkins documenta i resti quasi totalmente distrutti della via Amerina (FREDERIKSEN, WARD-PERKINS

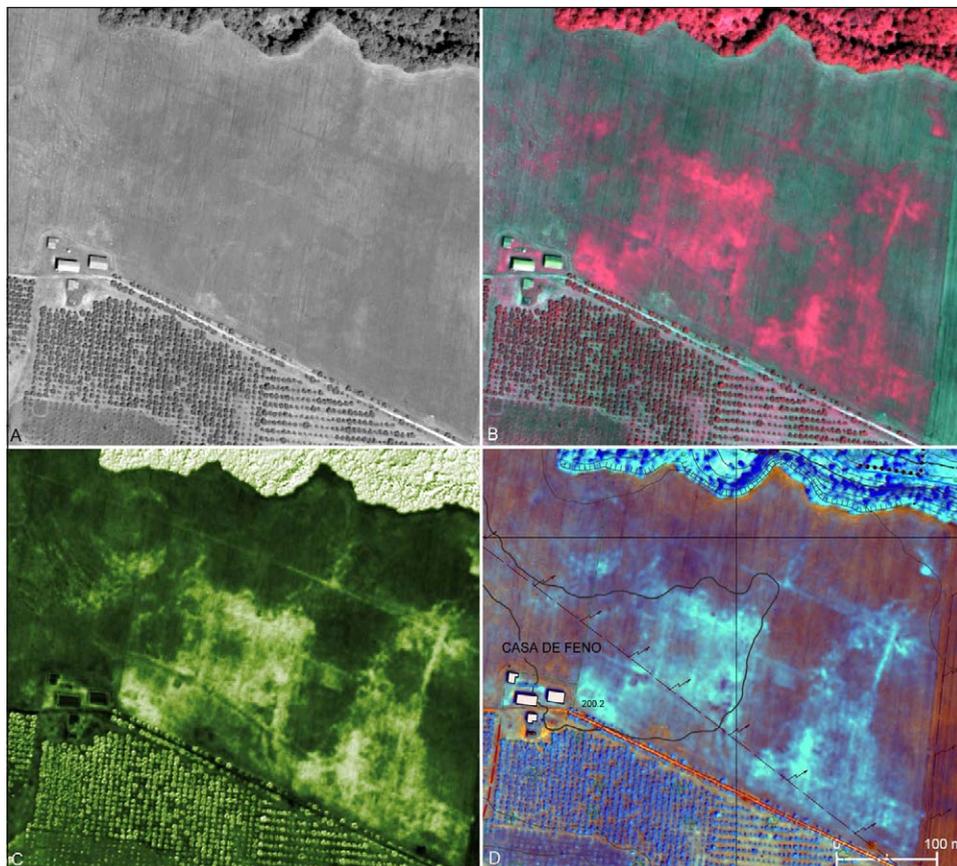


Fig. 5 – Suburbio meridionale di *Falerii Novi* nelle elaborazioni dell'immagine WorldView-2 del 2011: A) pancromatica (PAN); B) composizione in falsi colori (NIR: R=4; G=3; B=2) dell'immagine pansharpened; C) NDVI; D) composizione in falsi colori dei prodotti di data fusion (R=PAN + G=NIR + B=NDVI) con sovrapposizione del livello cartografico nel GIS: le tracce si concentrano maggiormente nel punto avente quota maggiore.

1957) individuati anche in traccia nella documentazione aerofotografica storica (SCARDOZZI 2003), le differenti bande spettrali dell'immagine variamente elaborate mettono in risalto anomalie di natura differente (per una lunghezza complessiva di 220 m), ma ugualmente pertinenti al tracciato della strada antica che attraversava il pianoro in senso NS. Nelle elaborazioni multispettrali l'esatto tracciato della strada è evidenziato nel settore più settentrionale del campo da una fascia maggiormente vegetata, corrispondente verosimilmente al cavo stradale antico, in parte spoliato dei basoli della massicciata e ora interrato (Fig. 6, A). L'immagine pancromatica, invece, resa più leggibile

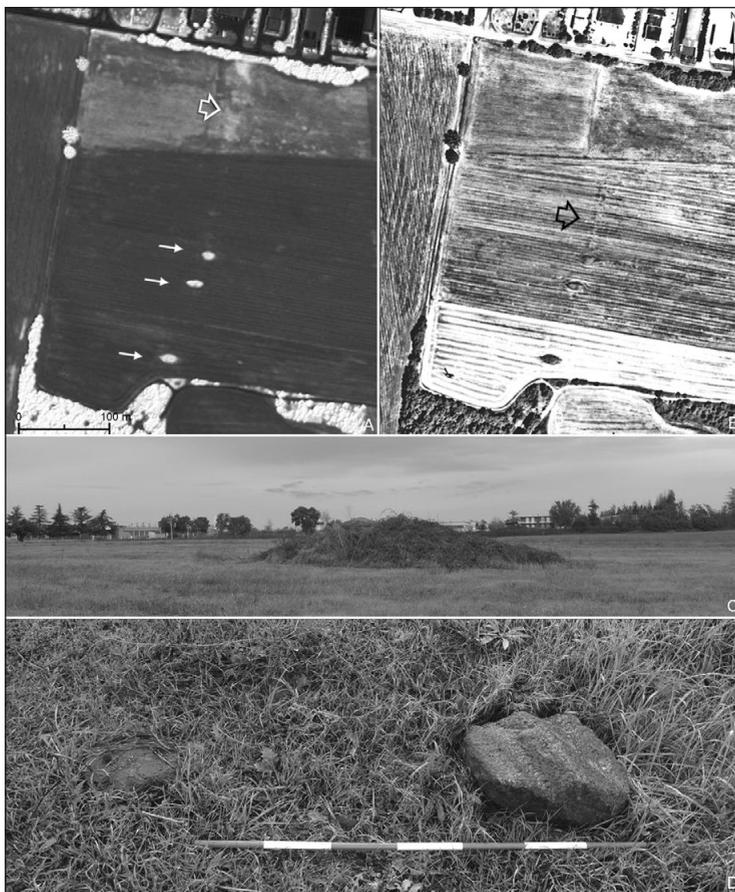


Fig. 6 – Casale Quartaccio. Tracce della via Amerina nell’elaborazione NDVI (A) e nella pancromatica (B) della WorldView-2 del 2011. C) Cumuli di pietrame e vegetazione, indicati dalle frecce piccole nell’immagine A. D) Basoli frammentari sparsi nel campo.

applicando il contrast stretching (filtro gaussiano), consente di visualizzare lungo lo stesso tracciato, ma più a S, una sottile anomalia lineare, dovuta probabilmente al differente contenuto locale di umidità, visto che quel settore del campo si presenta privo di copertura vegetativa (Fig. 6, B). Oltre che dal dato bibliografico, l’interpretazione è qui confortata dall’indagine diretta sul campo, attraverso la quale è stato possibile verificare la presenza di basoli interi o frammentari sparsi lungo l’allineamento (Fig. 6, D). A questi si aggiungono tre cumuli di pietrame vario (tra cui anche basoli) disposti in mezzo al campo, perfettamente in asse con il tracciato ricostruibile della via

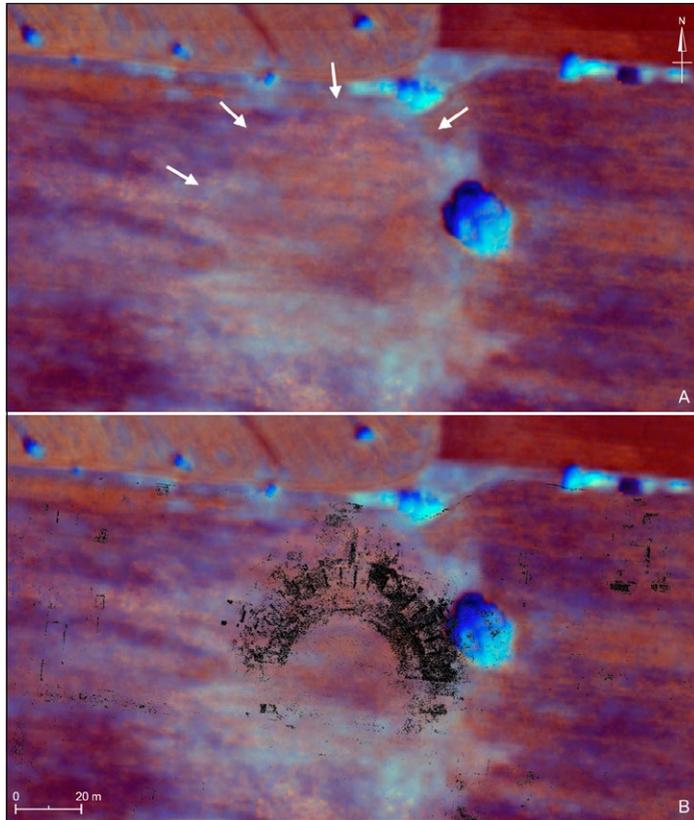


Fig. 7 – A) Tracce del teatro nel prodotto di data fusion dell'immagine WorldView-2 del 2011 (R=PAN + G=NIR + B=NDVI); B) visualizzazione integrata del prodotto satellitare e delle strutture del teatro individuate nelle prospezioni GPR (anomalie in nero: da VERDONCK *et al.* 2020, fig. 4 - "Falerii Novi\_field 4" time slices da 13-14 ns a 23-24 ns - Archaeology Data Service [https://archaeologydataservice.ac.uk/archives/view/roman-cities\\_ahrc\\_2019/](https://archaeologydataservice.ac.uk/archives/view/roman-cities_ahrc_2019/)).

Amerina e formati nel tempo contestualmente al disfacimento del selciato stradale antico (Fig. 6, C).

Anche per l'area all'interno delle mura di *Falerii Novi* è stato possibile fare alcune osservazioni in merito alla crescita disomogenea della vegetazione in corrispondenza delle strutture sepolte del teatro. Dal prodotto di data fusion PAN + NIR + NDVI, che ha enfatizzato i diversi valori di riflettanza dell'area, è stato possibile individuare con discreta esattezza il tracciato dell'emiciclo esterno del teatro (Fig. 7, A), che, come è possibile verificare grazie all'integrazione dei dati nella piattaforma GIS, coincide con i risultati ben

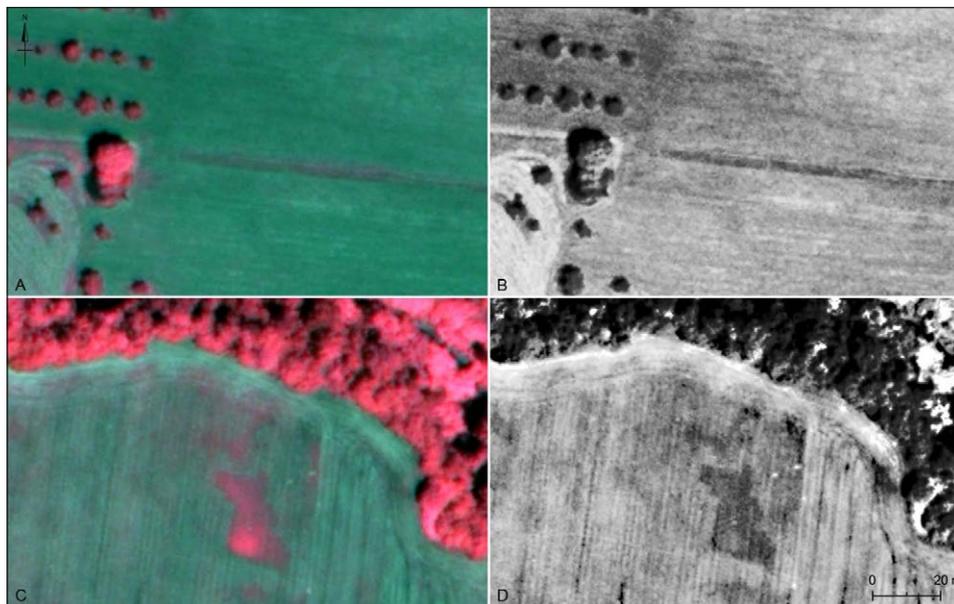


Fig. 8 – Dettagli delle tracce riferibili ad un tratto di strada sepolto all'interno dell'area urbana (A, B) e ad ambienti scavati nel suburbio meridionale della città, visualizzati nella composizione in falsi colori (NIR: R=4; G=3; B=2) dell'immagine pansharpened e nella pancromatica enfatizzata della WorldView-2 del 2011 (B, D).

più precisi delle recenti prospezioni geofisiche (Fig. 7, B). Sempre per l'area urbana, operazioni di miglioramento mediante l'applicazione dello stretching gaussiano sull'immagine pancromatica hanno consentito di discriminare la traccia prodotta da uno degli assi stradali sepolti orientati in senso EO (in particolare il tratto su cui si affacciano le *insulae* IX, X, XI da N e le *insulae* XXIV, XV, XVI da S). Se nell'immagine multispettrale il canale del Vicino Infrarosso aiuta a comprendere con immediatezza la natura dell'anomalia (Fig. 8, A), ossia un cavo stradale ricoperto da interro con crescita di vegetazione più fitta, l'immagine pancromatica migliorata consente di apprezzare maggiormente il dettaglio spaziale della strada (Fig. 8, B), misurabile per una larghezza di 2,80 m.

Un altro esempio di come il contrasto radiometrico della pancromatica sia risultato molto utile nella puntuale restituzione grafica delle tracce è quello di un'anomalia individuata subito a S dalla città, lungo il bordo meridionale del Rio del Purgatorio, anch'essa già individuata nell'esame delle immagini da Google Earth e interpretata come pertinente ad un incasso di cava (MASTROIANNI 2016). Si tratta di una marcata traccia da vegetazione in negativo, imputabile al riempimento di uno o più vani



Fig. 9 – Immagine WorldView-2 del 2014. A) nel riquadro bianco, campo interessato da crescita anomala e differenziata di vegetazione; B) dettaglio dell'area in esame: risultato dell'enhancement delle anomalie (1 e 2) mediante la composizione in falsi colori dei vari prodotti elaborati ( $R=NIR+G=PCA1+B=NDVI$ ).

scavati nel banco roccioso (Fig. 8, C-D). La traccia può effettivamente riferirsi ad un piccolo settore di estrazione di materiale lapideo, del quale non si esclude l'ipotesi di un successivo riutilizzo per scopi funerari, come ambiente di accesso a una o più tombe rupestri (una sorta di atrio aperto), viste la forma, le sue dimensioni complessive (ca. 30×20 m) e lo stretto rapporto topografico con le numerose tombe scavate in basso sul fianco roccioso del fosso e pertinenti alla necropoli meridionale della città di *Falerii Novi*. Questa interpretazione risulta avvalorata se integrata con i risultati della campagna di rilevamento LiDAR condotta nel 2005, che, attraverso tecniche di rimozione della vegetazione, ha permesso di individuare ampi settori di cave antiche lungo le pareti della forra, mettendo in luce un massiccio intervento antropico nella trasformazione del paesaggio originario (OPITZ 2009). È stato infatti osservato che la coltivazione dei settori estrattivi, avvenuta contestualmente all'abbassamento del piano di campagna esterno alle mura, era funzionale non solo all'approvvigionamento del materiale costruttivo delle mura, ma consentiva al tempo stesso di disporre di poderosi fronti rocciosi entro cui ricavare numerosi gruppi di tombe a camera. Questi interventi conferivano alla città, sorta di fatto in un luogo totalmente pianeggiante, un significativo impatto visivo e simbolico, soprattutto per chi veniva da S.



Fig. 10 – Immagine aerea del 1 luglio 2019 (da Google Earth) in cui sono visibili nuove tracce riferibili al tempio (n. 1), individuato grazie alle recenti prospezioni GPR (di cui è riportato un dettaglio delle depth slices a 0,80-0,50 m nel riquadro: da VERDONCK *et al.* 2020, fig. 4) e nuove tracce relative al teatro (n. 2).

### 3.4 Immagine satellitare GeoEye-1 del 2013

Rispetto ai dati del 2010 e del 2011 sopra esaminati, l'immagine GeoEye-1 del 2013 riproduce l'area in esame nella stessa stagione, ma a distanza, rispettivamente, di tre e due anni. Nell'immagine pansharpended elaborata in falsi colori (4-3-2), le anomalie da vegetazione manifestatesi nel 2013 sono meno definite e hanno un aspetto più confuso se confrontate con quelle visibili negli anni precedenti. Questa circostanza può essere probabilmente imputabile alle continue lavorazioni agricole (che in questo caso si limitano alla sola movimentazione superficiale del terreno causata da erpicature poco profonde realizzate per la semina), le quali, però, hanno progressivamente eroso i depositi terrosi superficiali cancellando le tracce ben riconoscibili negli anni appena precedenti.

Nella stessa immagine risultano inoltre ancora parzialmente visibili le tracce del tratto viario urbano orientato in senso EO e del tratto suburbano della via Amerina a N della città, in corrispondenza di Casale Quartaccio.

### 3.5 Immagine satellitare WorldView-2 del 2014

Da un primo esame di questa immagine si nota che le tracce relative all'edificio suburbano meridionale sono del tutto invisibili nei dati WorldView-2

del 2014, dove la vegetazione, in uno stadio ormai avanzato di crescita (l'acquisizione è infatti avvenuta a ridosso dell'inverno), copre in maniera fitta e omogenea l'intera estensione del campo. Al contrario delle altre, però, la nuova immagine consente di porre maggiore attenzione su alcune tracce da vegetazione presenti nel suburbio nord-occidentale, facilmente visibili perché relative alle prime fasi di crescita dell'erba all'interno di un campo evidentemente interessato da pratiche di lavorazione differenti (Fig. 9, A). La combinazione tra canale del Vicino Infrarosso, prima banda della Principal Component Analysis e prodotto NDVI (NIR+PCA1+NDVI) ha messo in forte risalto le anomalie individuate e, sebbene sia difficile avanzare precise ipotesi interpretative, le tracce potrebbero tuttavia essere messe in relazione con le strutture suburbane individuate nello stesso campo, ma più a E, grazie all'esame delle foto aeree storiche (SCARDOZZI 2004) e alla seconda campagna di prospezioni geofisiche condotte a *Falerii Novi* (HAY *et al.* 2000).

Dalle foto aeree infatti è emerso un ampio settore abitativo in traccia (in precedenza occupato da una necropoli), organizzato lungo il tracciato della via Amerina uscente dalla Porta Nord e lungo i brevi tratti di strade secondarie ad essa perpendicolari. Le successive prospezioni geofisiche hanno ampliato il quadro delle conoscenze, confermando quanto individuato in traccia e mettendo in evidenza, nel settore a O della traccia extraurbana della via Amerina, alcune strutture di carattere funerario, alcune anomalie pertinenti probabilmente ad antichi fossi di delimitazione di campi e altre anomalie lineari ritenute più tarde. Solo nell'area interessata dalle tracce individuate sull'immagine WorldView-2 sia le foto aeree che le prospezioni geofisiche non hanno restituito dati, ma la stretta relazione topografica, in particolare dell'anomalia n. 2 con quanto già individuato, potrebbe essere tuttavia significativa (Fig. 9, B, n. 2). Nella traccia lineare che si vede a O dell'acquedotto potrebbe riconoscersi forse un asse stradale (Fig. 9, B, n. 1).

#### 4. CONCLUSIONI

Il lavoro di selezione, elaborazione e analisi di cinque diverse immagini satellitari ha consentito di esaminare un palinsesto di tracce e altre anomalie. Una volta contestualizzate, verificate sul terreno quando è stato possibile, e messe in relazione con i dati già noti, la loro natura archeologica ha acquisito una maggiore affidabilità interpretativa.

Per quanto riguarda l'area urbana di *Falerii Novi*, sebbene non siano emerse tracce archeologiche di un certo rilievo, l'utilizzo strategico delle proprietà spettrali dell'immagine QuickBird-2 del 2003, enfatizzate mediante il calcolo dell'Indice di Vegetazione NDVI, ha consentito di individuare e distinguere le aree di maggiore erosione degli strati superficiali del suolo e quelle di maggiore deposizione del terreno colluviale. Questo

risultato mette in luce un fenomeno preoccupante per la conservazione del sito archeologico, che consiste nel progressivo “livellamento” del piano di campagna prodotto dalle continue lavorazioni agricole; ciò, oltre a modificare l’orografia originaria dell’area, ne sta cancellando irreversibilmente gli strati archeologici più esposti. A tal proposito, una recente immagine aerea del 2019, consultabile in Google Earth (Google Earth 2020 Google LLC) in cui sono invece nuovamente visibili le tracce del teatro e, per la prima volta, quelle relative al probabile tempio individuato dalle ultime prospezioni geofisiche in prossimità della porta meridionale (Fig. 10, n.1), documenta l’ulteriore perdita di suolo superficiale e la progressiva distruzione delle strutture antiche sepolte.

I data fusion dei vari risultati di elaborazione delle immagini satellitari acquisite tra il 2010 e il 2013, tutte nel mese di luglio, si sono invece rivelati piuttosto efficaci nell’individuazione di alcune tracce da vegetazione nel territorio circostante la città, in particolare quelle relative al tracciato della via Amerina a N e soprattutto quelle pertinenti a una probabile villa suburbana a S della città. Tale circostanza suggerisce che fattori come il tipo di uso del suolo (pascolo), le annesse pratiche di lavorazione e le condizioni climatiche dell’area rendono il mese di luglio particolarmente vantaggioso per l’individuazione di tracce da vegetazione. Queste ultime denunciano lo stadio ormai avanzato di danneggiamento degli strati archeologici; infatti, da una lettura integrata con foto aeree storiche e cartografia storica, emerge, non a caso, che il campo in cui è documentata la villa romana è stato interessato nei decenni precedenti da scassi agricoli per l’impianto di un vigneto, prima, e di altre coltivazioni arboree successivamente eradicata, poi.

L’immagine satellitare del 2014, acquisita in un periodo dell’anno differente, ha offerto invece la possibilità di osservare delle tracce da vegetazione in un settore specifico del suburbio settentrionale che non ha mai restituito alcun dato nelle ricerche precedenti.

ILARIA MICCOLI

Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale - CNR  
ilaria.miccoli@ispc.cnr.it

## BIBLIOGRAFIA

- BRUNETTI NARDI G. 1972, *Repertorio degli scavi e delle scoperte archeologiche nell’Etruria meridionale*, II, Roma, CNR, 40-42.
- BRUNETTI NARDI G. 1981, *Repertorio degli scavi e delle scoperte archeologiche nell’Etruria meridionale*, III, Roma, CNR, 97-101.
- CAMPANA S. 2004, *Le immagini da satellite nell’indagine archeologica: stato dell’arte, casi di studio, prospettive*, «Archeologia Aerea», 1, 280-299.
- DAINELLI N. 2011, *L’osservazione della Terra. Telerilevamento. Manuale teorico-pratico per l’elaborazione delle immagini digitali*, Palermo, Dario Flaccovio Editore.

- DE ANGELI S. 2017, *La via Amerina-Annia e Falerii Novi. Osservazioni e proposte sull'origine e lo sviluppo di una via pubblica romana*, «Analysis Archaeologica. An international journal of Western Mediterranean archaeology», 3, 45-61.
- DE ANGELI S., BATTISTIN F. 2020, *Da CLIMA a RESEARCH: monitoraggio e valutazione del rischio nei siti archeologici mediante l'applicazione di tecnologie di remote sensing e GIS*, in A. RUSSO, I. DELLA GIOVAMPAOLA (eds.), *Monitoraggio e manutenzione delle aree archeologiche: cambiamenti climatici, dissesto idrogeologico, degrado chimico-ambientale. Atti del Convegno internazionale di studi (Roma 2019)*, Roma, L'Erma di Bretschneider, 275-279.
- DE LUCIA BROLLI M.A. 1991, *L'Agro Falisco*, Roma, Quasar.
- DE LUCIA BROLLI M.A. 1996, Falerii Novi. *Novità dall'area urbana e dalle necropoli*, «Rendiconti della Pontificia Accademia Romana di Archeologia», 68, 21-68.
- DE LUCIA BROLLI M.A., BIELLA M.C., SUARIA L. 2012, *Civita Castellana e il suo territorio. Ricognizioni archeologiche e archivistiche*, Roma, Officina Edizioni, 134.
- DI STEFANO MANZELLA I. 1979, Falerii Novi negli scavi degli anni 1821-1830 con un catalogo degli oggetti scoperti, un'appendice di documenti inediti e una pianta topografica, «Memorie della Pontificia Accademia Romana di archeologia», 12, 2, 17-46.
- DI STEFANO MANZELLA I. 1990, *Lo stato giuridico di Falerii Novi dalla fondazione al III sec. d.C.*, in AA.VV. (eds.), *La civiltà dei Falisci. Atti del XV Convegno di Studi Etruschi e Italici (Civita Castellana 1987)*, Firenze, Leo S. Olschki, 340-367.
- FREDERIKSEN M.W., WARD-PERKINS J.B. 1957, *The ancient road system of the Central and Northern Ager Faliscus*, «Papers of the British School at Rome», 25, 67-208.
- GAMURRINI G.F., COZZA A., PASQUI A., MENGARELLI R. 1972, *Carta Archeologica d'Italia (1881-1897). Materiali per l'Etruria e la Sabina, Forma Italiae, Serie II. Documenti*, 1, Firenze, Leo S. Olschki.
- HAY S., JOHNSON P., KEAY S., MILLET M. 2010, Falerii Novi: *Further survey of the northern extra-mural area*, «Papers of the British School at Rome», 78, 1-38.
- KEAY S., MILLETT M., POPPY S., ROBINSON J., TAYLOR J., TERRENATO N. 2000, Falerii Novi: *A new survey of the walled area*, «Papers of the British School at Rome», 68, 1-94.
- LASAPONARA R., MASINI N. 2012, *Satellite Remote Sensing: A New Tool for Archaeology*, New York, Springer.
- MASTROIANNI D. 2016, Falerii Novi: *spunti per un update topografico vettorializzato della città romana. Nuovi dati dall'area meridionale urbana ed extraurbana*, «Archeologia e Calcolatori», 27, 197-208 ([http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF27/10\\_Mastroianni.pdf](http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF27/10_Mastroianni.pdf)).
- OPITZ R. 2003, *Integrating lidar and geophysical surveys at Falerii Novi and Falerii Veteres (Viterbo)*, «Papers of the British School at Rome», 77, 1-27.
- SCARDOZZI G. 2003, Falerii Novi. *Fabrica di Roma, Viterbo*, in M. GUAITOLI (ed.), *Lo sguardo di Icaro. Le collezioni dell'Aerofototeca Nazionale per la conoscenza del territorio*, Catalogo della mostra, Roma, Campisano Editore, 394-402.
- SCARDOZZI G. 2004, Falerii Novi: *georeferenziazione di tracce aerofotografiche relative all'area extraurbana settentrionale*, «Archeologia Aerea», 1, 145-154.
- SCARDOZZI G. 2016, *An introduction to satellite remote sensing in archaeology: State of art, methods and applications*, in F. BOSCHI (ed.), *Looking to the Future, Caring for the Past. Preventive Archaeology in Theory and Practice. Proceedings of the 2013-2014 Erasmus IP Summer School in Preventive Archaeology: Evaluating Sites and Landscapes. Methods and Techniques for Evaluating the Archaeological Value*, Bologna, Bononia University Press, 217-239.
- VERDONCK L., LAUNARO A., VERMEULEN F., MILLETT M. 2020, *Ground-penetrating radar survey at Falerii Novi: A new approach to the study of Roman cities*, «Antiquity», 94, 375, 705-723.

ABSTRACT

This paper presents some results obtained by the application of remote sensing methodologies in the study and monitoring of the Roman city of *Falerii Novi* and its surrounding area. This landscape changes quickly and for this reason is suitable for non-invasive investigation, which ensure the regular tilling of the land and allow the monitoring of the conservation of the ancient buried structures. Specifically, the research concerns the experimental application of the recent image processing methodologies on five high-resolution satellite images (one QuickBird-2, two GeoEye-1 and two WorldView-2 acquired between 2003 and 2014). The aim of this processing phase is to enhance spectral, spatial and radiometric properties of the images and so, to facilitate the identification of the archaeological marks related to buried structures. The photointerpretation was necessarily supported by the examination of the bibliographic sources, and was validated, where was possible, by field checks. In general, no significant archaeological marks have emerged in the urban area, but the strategic use of the spectral properties of the images has allowed the identification of the areas with the greatest erosion of the surface soil and those of greatest deposition of the colluvial soil. In the extra-urban area, on the other hand, vegetation marks relating to a probable suburban villa in the immediate territory to the South of the city and to the route of the Via Amerina to the North have been identified.