

Il rilievo tridimensionale del tratto urbano dell'Arno fiorentino

Giorgio Valentino Federici ^(a), Simona Francalanci ^(b), Enio Paris ^(c), Luca Solari ^(d)

^(a) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze, via di Santa Marta 3, 50139, Firenze, toscana2016@gmail.com

^(b) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze, via di Santa Marta 3, 50139, Firenze, simona.francalanci@unifi.it

^(c) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze, via di Santa Marta, 3, 50139, Firenze, enio.paris@unifi.it

^(d) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze, via di Santa Marta 3, 50139, Firenze, luca.solari@unifi.it

1. Il Piano di Monitoraggio del Fiume Arno

A cinquant'anni dall'alluvione del 1966 è stato realizzato il Progetto Firenze 2016 (www.firenze2016.it) con l'obiettivo di promuovere progetti, idee e nuove azioni per una efficace prevenzione e una crescita della cultura del rischio. Tra le numerose iniziative intraprese nell'ambito del Progetto Firenze 2016, particolare rilevanza riveste il Piano di Monitoraggio del Fiume Arno finalizzato alla realizzazione di rilievi e misure che consentano di accrescere la conoscenza del fiume per una prevenzione del rischio idraulico sempre più adeguata alle necessità della città di Firenze e delle altre aree interessate.

Era apparso infatti paradossale constatare che, dopo quasi 50 anni dall'alluvione del 1966, la conoscenza delle principali condizioni fisiche di uno dei più importanti fiumi italiani, che attraversa il centro storico dichiarato Patrimonio dell'Umanità dall'UNESCO già nel 1982, non fosse superiore a quella di tanti altri corsi d'acqua che viceversa rivestono un'importanza molto inferiore in termini di esposizione al rischio di alluvione della popolazione e dei beni storico-ambientali. Il Piano di Monitoraggio ha avuto come obiettivo l'acquisizione del livello di base di conoscenza sul quale sviluppare, valutare e aggiornare gli strumenti di prevenzione riguardanti:

- ∞ l'affidabilità delle stime delle portate di piena che possono transitare nel tratto urbano in sicurezza, contenibili cioè all'interno delle spallette dei lungarni;
- ∞ la valutazione dell'efficacia degli interventi di riduzione del rischio, come per esempio l'abbassamento delle platee di Ponte Vecchio e di ponte Santa Trinita (già effettuato negli anni '70), o la realizzazione di casse di espansione;
- ∞ la verifica di stabilità dei manufatti in alveo e delle opere storiche, come le fondazioni dei ponti, dei muraglioni di sponda, delle pescaie;
- ∞ il controllo dei fenomeni erosivi e di sovralluvionamento indotti dalla dinamica d'alveo;
- ∞ il fenomeno del trasporto solido al fondo e in sospensione.

L'insieme di queste attività risulta fondamentale per l'implementazione di un qualsiasi modello idraulico del Fiume Arno che risulti fisicamente basato. La conoscenza della topografia tridimensionale del fondo alveo è infatti necessaria per lo sviluppo di modelli idraulici e numerici sia bidimensionali che tridimensionali, che consentano una interpretazione più accurata dei complessi fenomeni idraulici che si verificano nel tratto urbano, quali i restringimenti di sezione dovuti ai numerosi ponti e alle pescaie oblique (Paris et. al., 2016).

A partire dal 2014 è stato avviato il monitoraggio del Fiume Arno nel tratto cittadino finalizzato a colmare, almeno in parte, le lacune conoscitive. Le attività, finanziate dal Comune di Firenze, Publiacqua S.p.A, Autorità Idrica Toscana, DICEA-Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale e CERAFRI dell'Università degli Studi di Firenze, hanno riguardato il rilievo tridimensionale ad alta risoluzione dell'alveo e delle strutture presenti, la misura delle portate liquide e solide e la caratterizzazione sedimentologica del materiale d'alveo.

I risultati del monitoraggio hanno permesso di rendere disponibili dati sulle portate di piena del Fiume Arno in Firenze mai misurati in precedenza. Inoltre il rilievo dell'alveo ha evidenziato criticità fino ad oggi sconosciute tra le quali il preoccupante fenomeno erosivo della pila sinistra del ponte Amerigo Vespucci che ha richiesto un importante intervento di messa in sicurezza, in corso di realizzazione (settembre 2019).

2. Il rilievo tridimensionale dell'alveo

Le metodologie classiche utilizzate per i rilievi topografici dell'alveo condotti fino agli anni 2000 permettevano di conoscere la geometria trasversale delle sezioni soltanto in corrispondenza delle tracce rilevate: il fondo compreso tra due successive sezioni risulta pertanto incognito. In molte situazioni ciò è accettabile. Ma non per il tratto urbano di Firenze dove: la morfologia del fiume è molto complessa e variabile nel tempo; fenomeni erosivi localizzati tra le sezioni possono non essere conosciuti o non adeguatamente rilevati; le fondazioni dei ponti storici, delle pescaie (traverse) e dei muraglioni di sponda, che sono sempre sotto il livello dell'acqua, necessitano di controlli e verifiche accurate.

In tale tratto del fiume si concentrano valori storico-ambientali inestimabili che da secoli sono continuamente esposti alle disastrose alluvioni dell'Arno. Pertanto nell'ambito del Progetto Firenze 2016 è stato deciso di utilizzare nuove tecnologie di rilievo disponibili per raggiungere un livello conoscitivo idoneo ad accrescere la sicurezza della popolazione e la tutela del patrimonio artistico.

Il rilievo dell'alveo con tecnica *multi-beam* e *laser scanning* permette di ricavare la mappa (modello digitale) tridimensionale del corso d'acqua, mettendo a nudo la morfologia della parte sommersa, e rilevando in dettaglio la parte emersa, con i seguenti vantaggi: conoscenza completa della geometria del fiume e delle opere emerse e sommerse; possibilità di monitorare lo stato di degrado del fondo e delle murature; preziosa base di dati per la costruzione di modelli matematici e fisici per la previsione del rischio.

La tecnologia *Multibeam MBES (Multi Beam Eco Sounding)* viene effettuata predisponendo l'ecoscandaglio su un mezzo natante, dal quale è possibile acquisire in maniera continua un numero elevatissimo di punti della topografia del fondo. La navigazione viene assistita attraverso un GPS di precisione; inoltre, per garantire l'accuratezza potenziale dello strumento, sono utilizzati dei sensori di moto per la compensazione del rollio e beccheggio nonché una girobussola di elevata precisione per la correzione della direzione.

I dati laser scanner sono acquisiti con tecnologia LIDAR (*LIGht Detection And Ranging*), ovvero lo strumento acquisisce delle nuvole di punti disposti irregolarmente sul terreno o sulla superficie colpita dal raggio laser; di tali punti sono note le coordinate, la quota e l'intensità di riflessione, da cui può essere agevolmente elaborato il modello digitale del terreno. Tale tecnica non consente di acquisire attraverso la superficie dell'acqua, ma soltanto le zone emerse, pertanto si integra ottimamente con la tecnica precedente che rileva il fondo sommerso.

Il tratto rilevato si estende per una lunghezza complessiva di circa 18 Km da Varlungo a Ponte a Signa (Fig. 1), suddiviso in 7 zone in base alla accessibilità e navigabilità del fiume, alla presenza delle pescaie e delle platee di alcuni ponti (ad es. il Ponte alle Grazie).

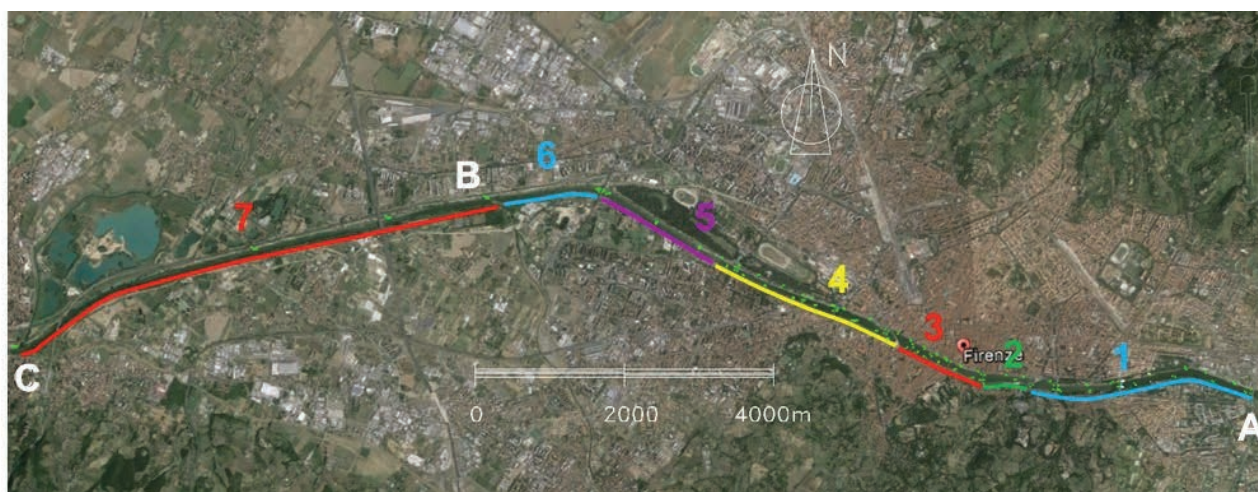


Figura 1 – Planimetria del tratto rilevato, con suddivisione nei 7 tratti da monte (Est) verso valle – A = Varlungo; B = foce Greve; C = Ponte a Signa (foce Bisenzio).

Le zone individuate sono le seguenti:

- ZONA 1 – dal Viadotto di Varlungo alla Pescaia di San Niccolò
- ZONA 2 – dalla Pescaia di San Niccolò al Ponte alle Grazie
- ZONA 3 – dal Ponte alle Grazie alla Pescaia di Santa Rosa
- ZONA 4 – dalla Pescaia di Santa Rosa alla Pescaia dell'Isolotto
- ZONA 5 – dalla Pescaia dell'Isolotto al Viadotto dell'Indiano
- ZONA 6 – dal Viadotto dell'Indiano alla foce del Fiume Greve
- ZONA 7 – dalla foce della Greve a Ponte a Signa (foce del Bisenzio).

Di seguito si riporta l'elenco dei sistemi utilizzati per lo svolgimento dei rilievi topo-batimetrici:

- ∞ Sistema per rilievi batimetrici battello pneumatico Nadir G18 l.f.t. 5,30 m.
- ∞ Sistema Multi-beam R2SONIC 2024: frequenza selezionabile 200-400 Hz, raggio di azione 1-500 m
- ∞ Sistema Laser Scanner LEICA HDS7000, con risoluzione di 0.1 mm e velocità di scansione fino a 1016727 pt/s
- ∞ Sistema navigazione inerziale Orion INS per la compensazione delle oscillazioni durante la navigazione
- ∞ GPS Leica 1230
- ∞ Software di acquisizione dati Qinsy Survey.

Nella figura 2 si illustra Il natante e l'attrezzatura impiegata per il rilievo geomatico. Il rilievo è stato effettuato dalla società Oikos con le proprie attrezzature.



Figura 2 - Il natante e l'attrezzatura impiegata per il rilievo geomatico

Al fine di valutare la precisione del rilievo tridimensionale e l'affidabilità dei dati con un sistema di misura indipendente, e per garantire un robusto inquadramento geodetico in ragione della grande mole di informazioni acquisite, al rilievo multibeam e laser scanner è stato associato un rilievo topografico basato su tecniche GNSS (*Global Navigation Satellite System*), utilizzando come "base" principale la Stazione Permanente GNSS IGMI, nodo delle reti Europee (EUREF, *EUropean REference Frame*) e nazionale (RDN, Rete Dinamica Nazionale) e situata circa a metà del tratto dell'Arno oggetto del rilievo; si sono anche impiegate - per una opportuna azione di controllo dei risultati - le stazioni PRAT (UNIFI), anch'essa nodo delle reti EUREF e RDN e 2 stazioni della rete ItalPos (Leica): CALA (Calenzano) e anche EMNS (Empoli) per la porzione più occidentale del rilievo (Fig. 3).

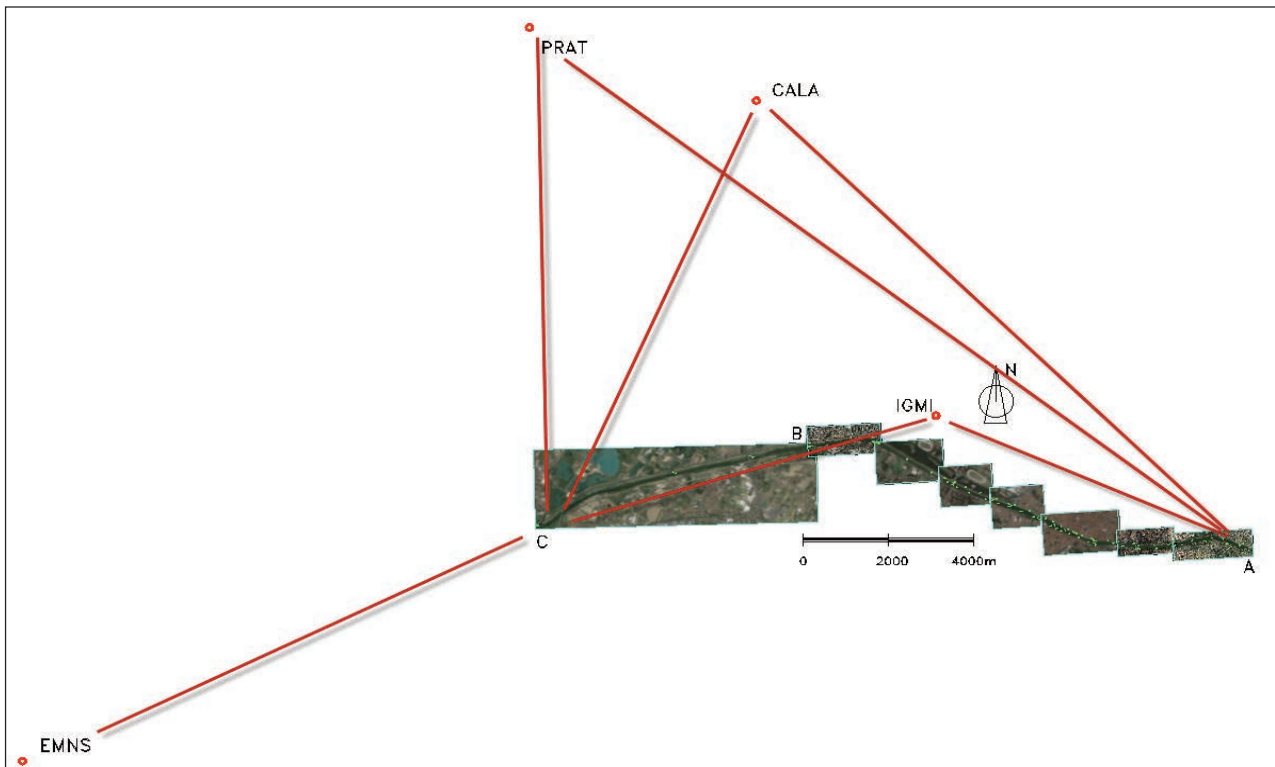


Figura 3 - Le stazioni permanenti GNSS (Global Navigation Satellite System) impiegate nelle determinazioni di posizione dei capisaldi

Le linee misurate dalle stazioni Permanenti ai vertici della griglia del rilievo costituiscono un numero di osservazioni sovrabbondante, così da garantire una precisione elevata in più di 50 punti, collocati per lo più sui ponti, e una buona intervisibilità.

I punti di inquadramento, rilevati in modalità statica (rapida), sono stati materializzati e accuratamente monografati; si sono scelti sempre punti stazionabili con treppiede o con "basetta", disposti su tutti i ponti (tranne Ponte Vecchio per motivi di ostruzione dell'orizzonte da parte dei fabbricati) e lungo le sponde, nelle zone più aperte, dove i segnali satellitari erano più disponibili. Naturalmente si è prevista una densità di punti noti maggiore là dove maggiori erano le esigenze di precisione (per lo più nella zona centrale), mentre nelle zone periferiche, caratterizzate da rive boscate o comunque coperte da una vegetazione importante, si sono ubicati punti di controllo più rarefatti.

Per quantificare gli eventuali scostamenti dalla corretta posizione dei punti del rilievo tridimensionale, si sono materializzati e rilevati - con un sistema misto satellitare e topografico descritto come sopra - oltre 80 punti di controllo (GCP - Ground Control Point), composti da target in formato A4, plastificati e incollati con resine trasparenti e rimovibili in diverse posizioni lungo l'alveo del fiume (Figura 4), così che potessero essere rilevati e riconosciuti all'interno delle nuvole di punti. La precisione nella determinazione della posizione dei centri dei target è stata spinta al cm in coordinate Est e Ovest e a pochi mm per le quote.

In questo modo si ha la possibilità di verificare le entità degli scostamenti delle nuvole di punti dai punti di controllo, così da poter poi "ricondizionare" dette nuvole con spostamenti calcolati punto per punto in modo da "rispettare" i vincoli

costituiti dalla coincidenza dei centri dei target riconosciuti con i corrispondenti centri rilevati per via topografica.



Figura 4 - Target plastificati posizionati sull'arcata di P.te Vecchio e sulla spalletta del P.te alle Grazie.

Al fine di illustrare il grado di dettaglio con cui sono stati acquisiti i dati si riportano di seguito alcune immagini relative ai risultati del rilievo nel tratto centrale. In figura 5 viene illustrato il rilievo effettuato in prossimità del Ponte alle Grazie, in viola le strutture del ponte rilevate tramite laser scanner, e in giallo la batimetria del fondo sommerso. In figura 6 si riporta la vista prospettica di Ponte Vecchio (in blu), visto da valle, e le platee di fondazione; il fondo alveo è illustrato in colore giallo/verde/rosso. I particolari e i dettagli con cui sono stati acquisiti sia il Ponte che il fondo alveo sono evidenti.

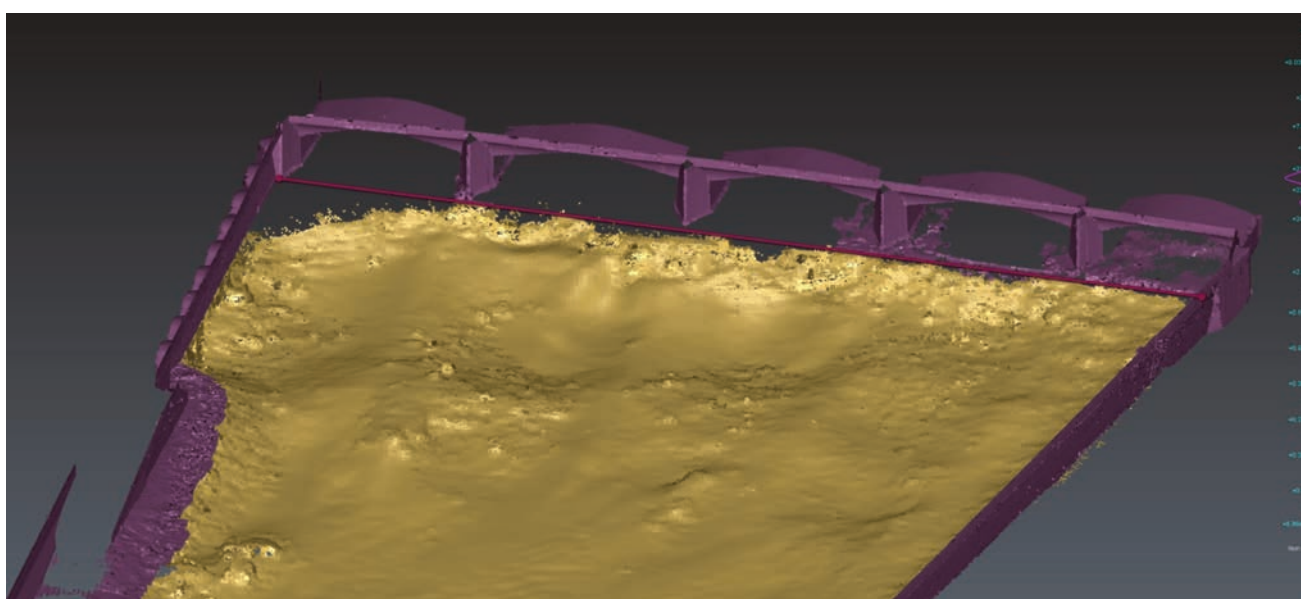


Figura 5- Vista del rilievo della zona del Ponte alle Grazie (Laser scanner in viola, multibeam in giallo).

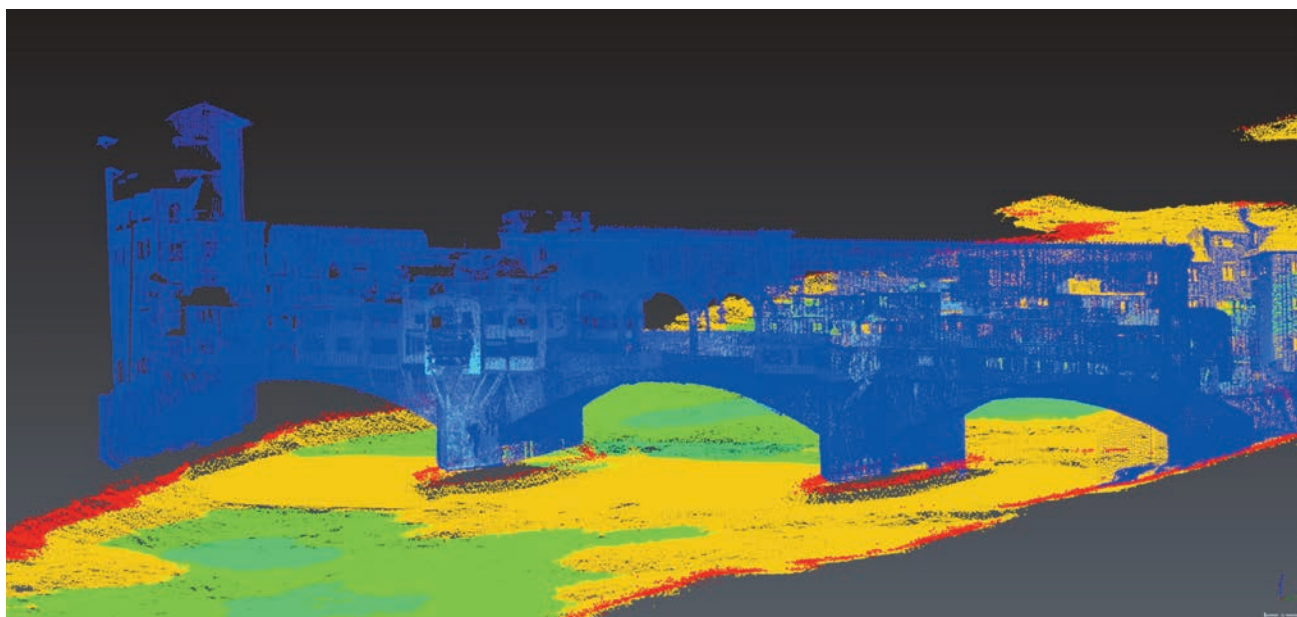


Figura 6– Vista prospettica del Ponte Vecchio e delle platee di fondazione.

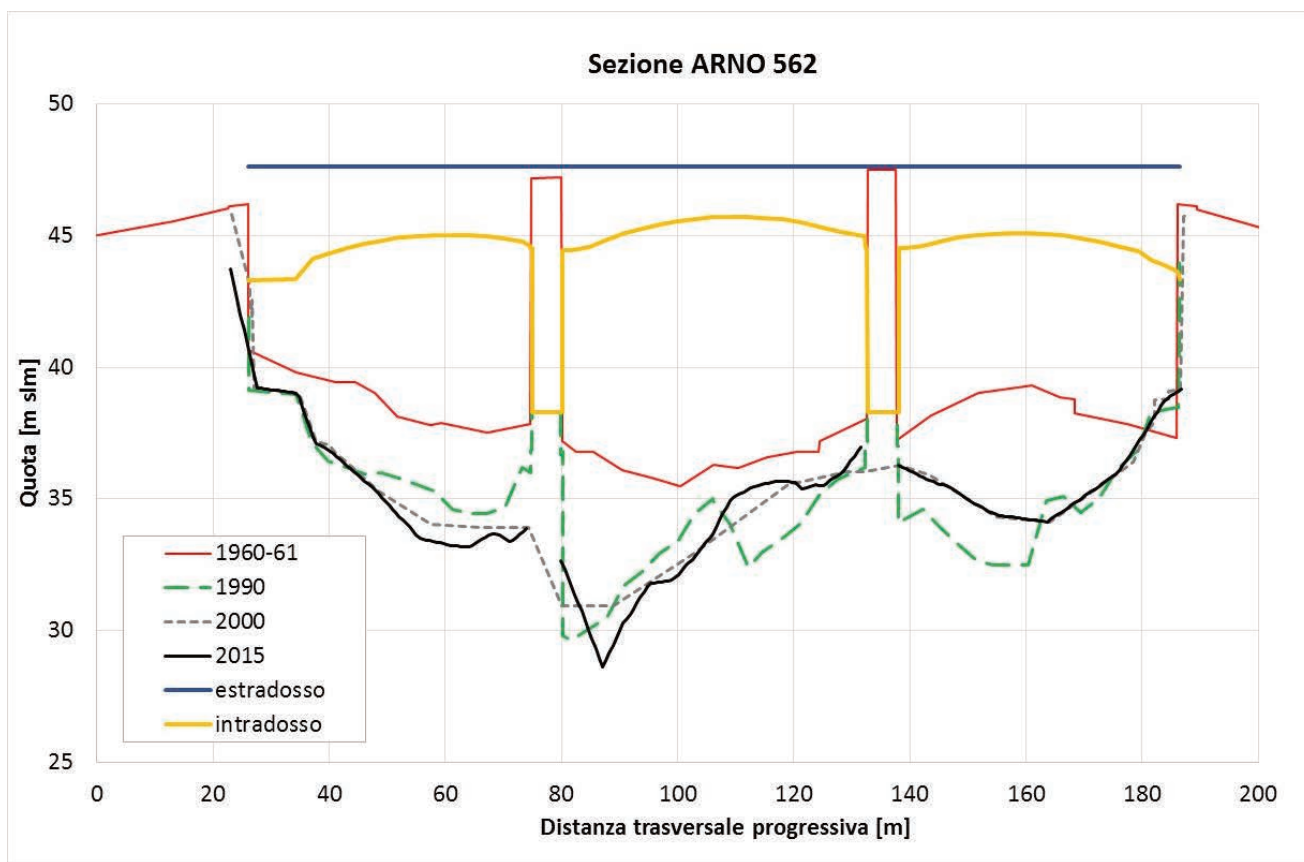


Figura 7 – Confronto dei rilievi nella sezione trasversale ARNO 562.

3. L'erosione della fondazione di Ponte Vespucci

Il rilievo del 2015 ha evidenziato che sussistono condizioni di ingente erosione in prossimità della pila sinistra del ponte Amerigo Vespucci. Il ponte è stato costruito tra il 1955 e il 1957 su progetto degli architetti Giorgio Giuseppe Gori, Enzo Gori e Ernesto Nelli e dell'ingegnere Riccardo Morandi.

I confronti tra i vari rilievi sono illustrati in Figura 7 per la sezione del Ponte Vespucci AR 562, ubicata alla distanza progressiva dalla foce di 106.25 km.

Si può osservare che condizioni di elevata erosione localizzata in prossimità della pila sinistra del ponte Vespucci erano presenti già nel rilievo del 1990, che presenta quote del fondo più basse in tutta la sezione rispetto al rilievo del 1960. Nel rilievo del 2000 si evidenzia una rinnovata tendenza al deposito nella parte destra della sezione, mentre permangono condizioni di erosione alla pila sinistra. Tuttavia la gravità dei fenomeni erosivi non può essere colta appieno utilizzando la metodologia tradizionale delle sezioni topografiche che forniscono informazioni esclusivamente lungo un allineamento prefissato. Infatti, grazie al rilievo tridimensionale adottato nel monitoraggio dell'alveo, si è potuto evidenziare il fenomeno di scalzamento alla base della pila sinistra del Ponte Vespucci che ha interessato i pali di fondazione per una profondità di circa 4 metri (Figura 8). Nella stessa figura l'immagine degli interventi di consolidamento in corso nell'estate 2019.

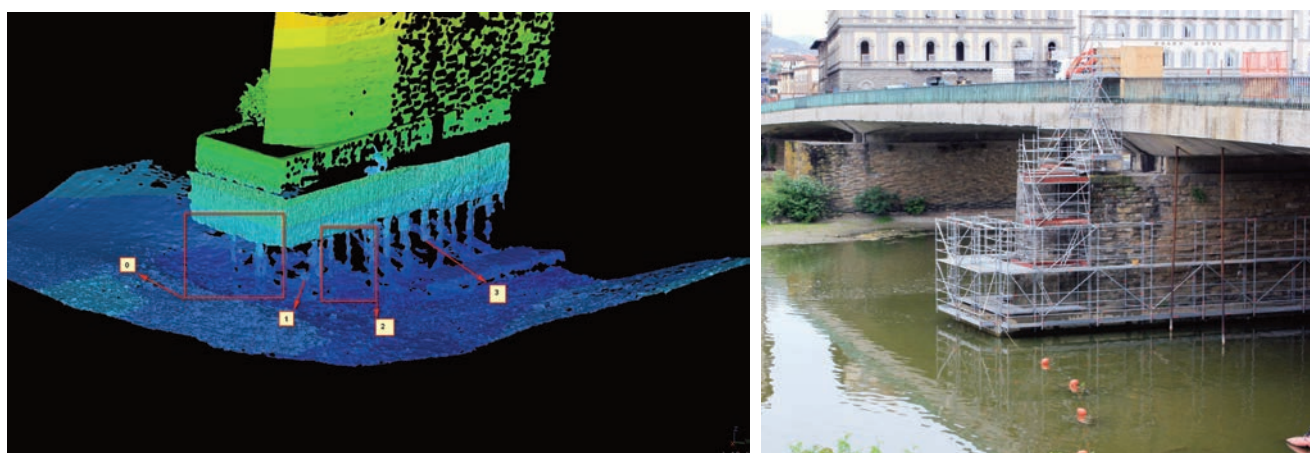


Figura 8 – Rilievo tridimensionale della pila sinistra del ponte Vespucci e intervento di consolidamento (Estate 2019)

Bibliografia

Paris, E., Francalanci S., De Ciccio P.N., Solari L., Gonnelli V. (2016), *La conoscenza per la prevenzione del rischio idraulico: il monitoraggio del Fiume Arno a 50 anni dall'alluvione del 1966*, Bollettino Ingegneri, ISSN:2035-2417, no. 7, pp. 9-32, 2016