

Castello di Bardineto: rilievo aerofotogrammetrico e restituzione a sei livelli

Il Castello di Bardineto (SV) è quanto resta di una cinta difensiva del XIII secolo, dei marchesi Del Carretto. Il Catalogo Generale dei Beni Culturali lo registra alla scheda ICCD 0700111999. Nel novembre del 1795, durante la battaglia di Loano, l'artiglieria francese ne demolì dodici lati sui sedici originari; da allora ne restano quattro. All'interno è oggi allestito un palco per le rappresentazioni all'aperto, teatrali e cinematografiche: una platea in calcestruzzo, passerelle con parapetti metallici e sedute lungo il perimetro.

Il rilievo è stato eseguito il **23 agosto 2026**. È un lavoro nostro, non una commessa, eseguito per verificare la catena di lavoro dello Studio su un manufatto con caratteristiche sfavorevoli.

Le condizioni di rilievo

Il manufatto presenta tre difficoltà che condizionano il metodo:

Paramento verticale non accessibile. Il muro esterno è alto quattordici metri e prospetta direttamente sulla strada anulare che circonda il castello. Non esiste una posizione da cui stazionare con strumentazione topografica classica per collimare punti sul paramento, né è possibile raggiungerli fisicamente per materializzarli.

Sviluppo verticale prevalente. Il soggetto si sviluppa in altezza più che in pianta: una copertura di tipo cartografico, a strisce parallele con asse camera verticale, restituirebbe il coronamento e la pianta ma non il paramento.

Assenza di punti alti. Non essendovi posizioni sopraelevate nell'intorno, ogni presa zenitale sulla sommità dipende esclusivamente dalla quota di volo.

Il piano di volo

Il piano di volo viene generato automaticamente dal radiocomando attraverso l'algoritmo di intelligenza artificiale **Smart 3D Explore**, grazie al payload aggiuntivo **Manifold 3** (unità di elaborazione da 100 TOPS installata a bordo dell'aeromobile).

Il procedimento si articola in due momenti. Il drone esegue una prima ricognizione e ne ricava un modello tridimensionale grezzo dell'oggetto; su quel modello l'algoritmo calcola una traiettoria che mantiene distanza e assetto costanti rispetto alla superficie da rilevare. Non si tratta di una rotta definita a priori su base cartografica: la geometria del volo discende dalla geometria del manufatto.

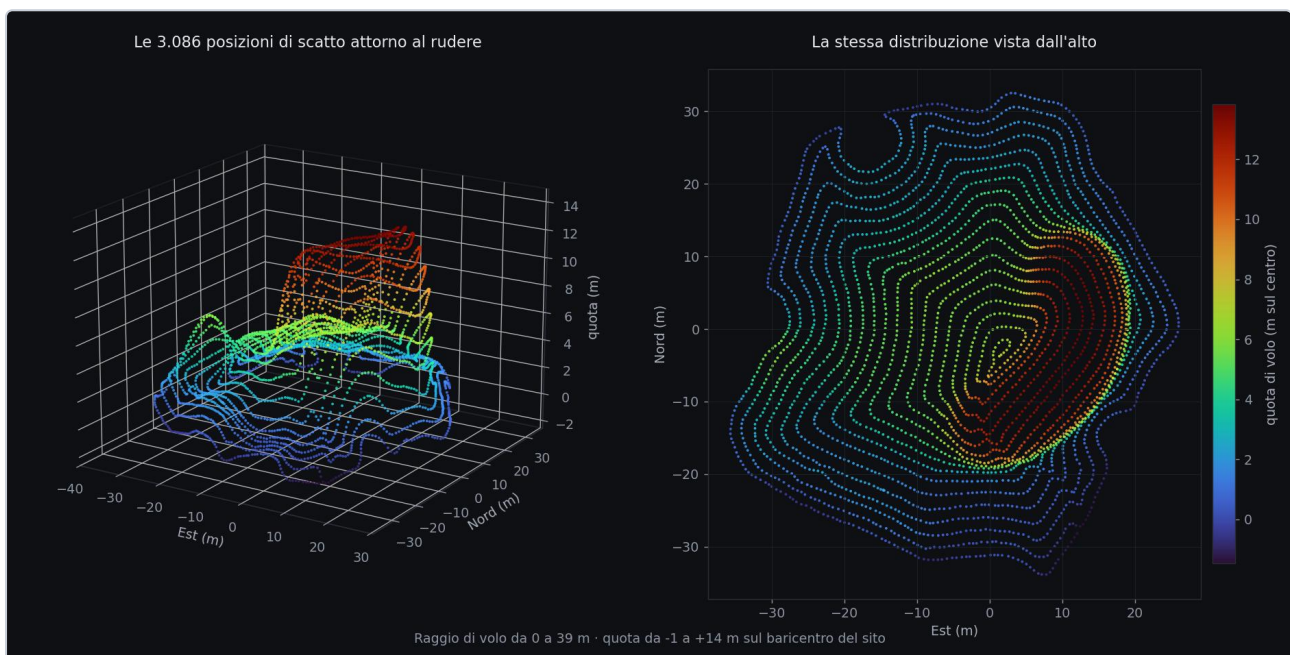
La differenza è operativa. Una rotta pianificata a terra su cartografia conosce le coordinate dei vertici ma non la posizione delle superfici verticali; su un rudere a pianta irregolare, con lati interrotti e altezze

diverse, produce coperture disomogenee sui paramenti. Con la pianificazione a bordo la traiettoria segue l'oggetto.

Il volo si è svolto in due riprese complementari:

- prima ripresa, raggio da 18 a 37 m, quota bassa — **1.241 fotogrammi**
- seconda ripresa, raggio da 30 m fino in prossimità delle mura, quota crescente — **1.845 fotogrammi**

Per un totale di **3.086 fotogrammi** acquisiti in circa venti minuti di volo effettivo, lungo una spirale a cupola che si stringe salendo.



Distribuzione delle 3.086 posizioni di presa, ricavata dal file di riferimento in EPSG:3003. Il colore rappresenta la quota di volo. Raggio compreso fra 39 m e 0,4 m dal centro; quota fra -1 e +14 m rispetto al baricentro del sito.

Verifica della copertura in sommità

Il drone non è salito oltre 14,3 m sopra il punto di decollo. La sufficienza della copertura zenitale è stata verificata sull'allineamento: per ciascuna cella di struttura al di sopra della quota 728 m sono state contate le camere che la sorvolano entro 25 m in pianta e ad almeno 1 m di quota superiore. Entro il perimetro del castello — 1.069 celle entro 40 m dal centro — le celle prive di copertura sono **zero**. Il franco fra la quota massima della struttura (736,34 m) e la camera più alta (740,53 m) è di **4,19 m**.

Strumentazione

Aeromobile	DJI Matrice 4E, sensore 4/3
Posizionamento	RTK in rete (NRTK), soluzione fissa sul 100% degli scatti
Elaborazione a bordo	payload DJI Manifold 3, 100 TOPS
Applicazione di volo	DJI Pilot 2
Strumentazione topografica	Stonex, controller UT10 con Cube-a

Il sensore restituisce fotogrammi di 5.280×3.956 pixel con focale di 12,29 mm e pixel di 3,49 μm : a dieci metri dal soggetto il GSD è di **2,8 mm**.

Punti di appoggio e di controllo

Sono stati impiegati nove punti, acquisiti con due procedure distinte.

Quattro bersagli a scacchiera posati sul piano di calpestio e battuti con antenna GNSS su palina topografica.

Cinque punti sul paramento murario esterno, non accessibile. Le coordinate sono state determinate per via fotogrammetrica con la funzione di acquisizione di punti inaccessibili di Cube-a, dal controller topografico.

⚠ La distinzione ha una conseguenza metrologica che va dichiarata. Il confronto fra i cinque punti sul paramento e la superficie ricostruita restituisce **7,1 mm** di scarto quadratico medio, con massimo di 12,0 mm su una soglia di accettazione di 50 mm posta prima della misura. Tale valore **non rappresenta l'errore del modello fotogrammetrico**, ma la composizione degli errori di due determinazioni fotogrammetriche indipendenti: quella del controller e quella del presente rilievo. Costituisce quindi un **limite superiore** dell'accuratezza, non una sua misura, e non è confrontabile con lo scarto dei bersagli a terra.

Accuratezza sui bersagli battuti

I quattro bersagli non sono stati impiegati nel calcolo dell'orientamento: l'allineamento poggia sul solo dato RTK e i bersagli costituiscono verifica indipendente. Le soglie di accettazione sono state dichiarate prima della misura: 20 mm in planimetria, 30 mm in quota, corrispondenti a 4-7 volte il GSD.

Lo scarto planimetrico risulta di **11,1 mm** come scarto quadratico medio, con massimo di **16,2 mm**.

Un bersaglio è stato escluso sulla base di una verifica indipendente dal sistema di riferimento: il confronto delle distanze reciproche fra i punti mostra fuori tolleranza esclusivamente le coppie che lo contengono (+25,5 e +39,5 mm), mentre la coppia gcp2–gcp4 si mantiene a +4,2 mm su 24,5 m di distanza. Il pannello, posato in cantiere non presidiato, si è verosimilmente spostato fra la battuta e il volo.

● **Non viene dichiarato alcun valore di accuratezza altimetrica.** I controlli disponibili non sono in grado di misurarla: i cinque punti sul paramento insistono su facce sub-verticali (componente verticale della normale compresa fra 0,025 e 0,428) e risultano quindi poco sensibili a uno scostamento in quota, mentre i bersagli a terra risentono dell'affondamento della punta della palina nel terreno erboso. Permane un residuo sistematico di +22,7 mm, la cui origine non è stata separata.

Coerenza metrologica degli elaborati

Dal rilievo derivano sei restituzioni: ortofoto, nuvola di punti colorata per quota, nuvola colorata per luminanza, nuvola a colori reali, modello a superfici texturizzato e 3D Gaussian Splatting.

Le sei restituzioni non costituiscono elaborazioni indipendenti. Discendono tutte dal medesimo orientamento esterno, calcolato una sola volta sui 3.086 fotogrammi, e sono inquadrate nel medesimo sistema di riferimento proiettato: **Gauss-Boaga ovest, EPSG:3003, con quote ortometriche.**

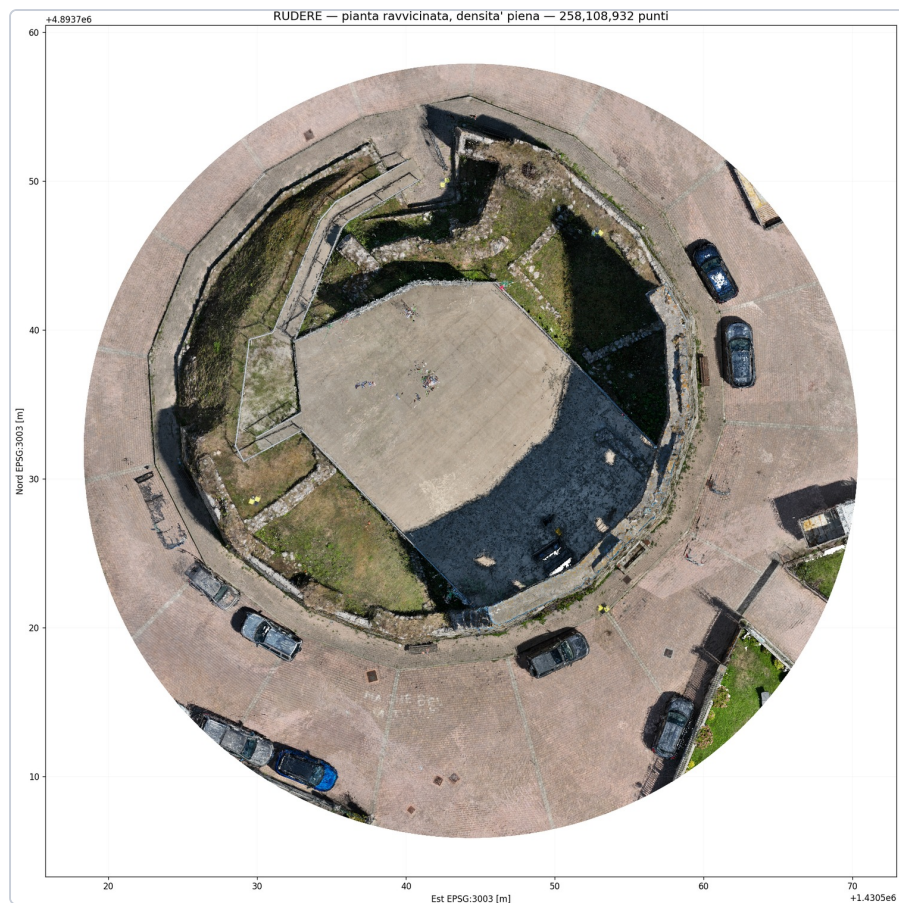
La trasformazione dal sistema geodetico globale a quello cartografico nazionale è stata eseguita mediante i **grigliati ufficiali IGM**. La scelta non è formale: sul medesimo sito, la trasformazione a sette parametri produce uno scarto planimetrico di **1,18 m** rispetto alla catena IGM, e il grigliato NTV2 di libera distribuzione uno scarto di **4,8 cm**. Nessuna delle due procedure segnala lo scostamento. Per la componente altimetrica il modello di geoidi ITALGEO2005 concorda con la catena IGM entro **1 mm** (48,735 contro 48,736 m di ondulazione).

La conseguenza operativa è che gli elaborati sono **sovrapponibili e confrontabili fra loro e con la cartografia di riferimento**: è possibile misurare lo scostamento fra ortofoto e modello a superfici, riportare una quota dalla nuvola sul modello a gaussiane, e integrare gli elaborati in un sistema informativo territoriale senza trasformazioni intermedie.

Elaborati

Nuvola di punti densa

672.387.357 punti sull'intera area ripresa; **168.502.591** sul manufatto e sulla cornice pedonale, dopo il ritaglio al bordo esterno del marciapiede. Densità sul manufatto di circa **121.500 punti/m²**, corrispondenti a un punto ogni 2,9 mm, in accordo con il GSD dichiarato. Le murature risultano risolte a due facce distinte, con spessore misurabile di circa 2,2 m.



Nuvola densa sul manufatto, a densità piena.

Modello a superfici texturizzato

15.000.597 facce dopo la rimozione dei frammenti isolati, con texture fotografica su quattro pagine da 8.192 pixel di lato. La risoluzione consente la lettura della tessitura muraria: singoli conci, giunti di malta, stuccature e colonizzazione biologica nelle fughe.



Ingrandimento sul paramento: conci e giunti di malta distinguibili.



Apertura nel paramento e tessitura muraria circostante.

Ortofoto

8.650 × 8.403 pixel a **5,0 mm/px**, generata su base geometrica del modello a superfici con riempimento dei vuoti e filtro di ghosting attivi. Buchi interni misurati: 0,00 m² su 1.199,5 m² di superficie.



Ortofoto sul palco allestito: platea in calcestruzzo, passerelle con parapetti e sedute. Sono riconoscibili due dei quattro bersagli a scacchiera.

3D Gaussian Splatting

2.578.314 gaussiane dopo il ritaglio al confine, addestrate su 50.000 iterazioni a partire dalle pose già orientate in Metashape, esportate in formato COLMAP. Non si tratta di una ricostruzione indipendente: l'ossatura geometrica è la medesima degli altri elaborati.

La restituzione a gaussiane conserva elementi che il modello a superfici non risolve: gli elementi metallici a sezione ridotta dei parapetti, le colonizzazioni licheniche sulla pietra, la transizione delle ombre proprie.



Dettaglio della restituzione a gaussiane.

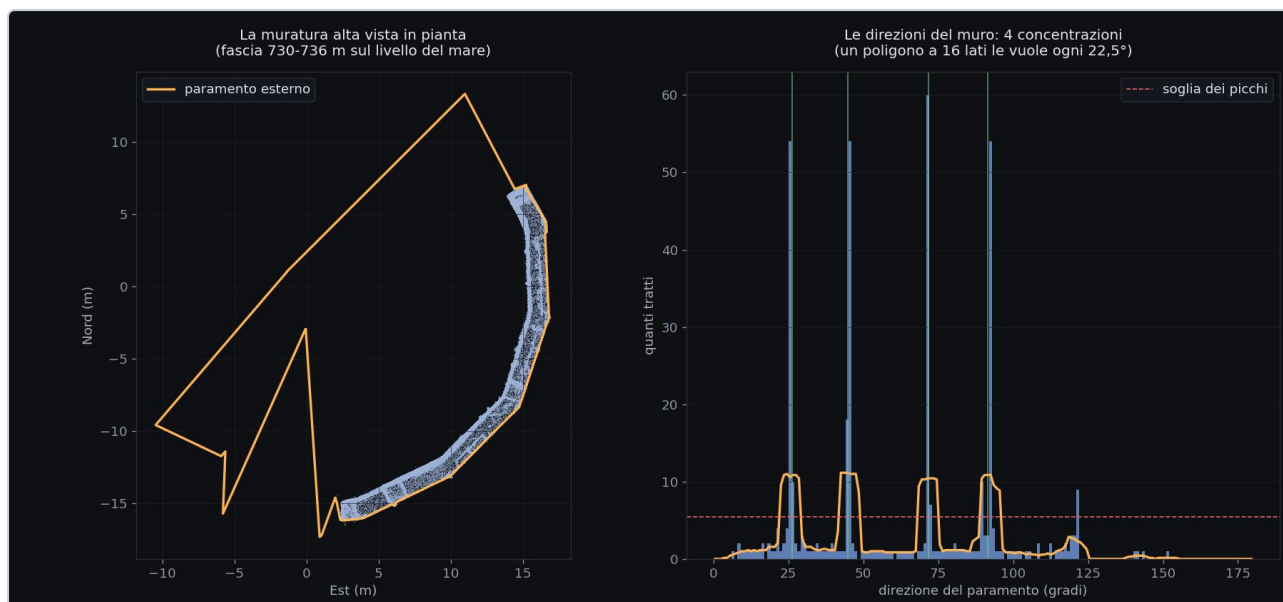
⚠ Il modello a gaussiane è fedele all'apparenza ma non costituisce un elaborato metrico autonomo: le misure si assumono sulla nuvola di punti e sul modello a superfici.

Verifica della geometria a sedici lati

Le fonti storiche indicano una cinta a pianta poligonale di sedici lati, di cui quattro superstiti. Il dato è verificabile sul rilievo.

Sono stati estratti i **29.161.954 punti** compresi nella fascia altimetrica 730,0-736,5 m, corrispondente alla sola muratura alta, e ne è stata analizzata l'orientazione del paramento lungo l'intero sviluppo perimetrale. Una superficie curva restituisce direzioni distribuite con continuità; una superficie poligonale le concentra su valori discreti.

direzioni discrete individuate	(26°, 45°, 72°, 91°)
sviluppo perimetrale con muratura	31% dell'angolo giro
passo angolare fra direzioni contigue	19° · 27° · 19° (media 21,7°)
passo teorico di un esadecagono regolare	22,5°



A sinistra la muratura alta in pianta; a destra la distribuzione delle direzioni del paramento, con le quattro concentrazioni individuate.

- La superficie muraria superstite risulta **poligonale e non curva**, con **quattro lati** riconoscibili: il dato conferma le fonti e corregge la descrizione preliminare, che riportava una pianta circolare.
- Il passo angolare misurato non rientra nella tolleranza di $\pm 3^\circ$ posta prima della misura rispetto al valore teorico di $22,5^\circ$: due passi su tre risultano fuori. Il dato è compatibile con una cinta poligonale a sedici lati realizzata con tecniche costruttive medievali, non con un poligono regolare.

Sintesi

Fotogrammi acquisiti	3.086
Fotogrammi orientati	3.075 (99,6%)
Punti di legame	1.733.499
Accuratezza planimetrica (s.q.m.)	11,1 mm
Accuratezza altimetrica	non dichiarabile con i controlli disponibili
Nuvola densa	672,4 milioni di punti
Elaborazione complessiva	25 h 56 min

Studio Tecnico Carieri — Geol. Guido Carieri Rilievo, elaborazione e restituzione · EPSG:3003, quote ortometriche