Archeologia e Calcolatori
Supplemento 15, 2026, 37-53
doi 10.19282/ACS.15.2026.04

ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI LIDAR A CASTELPORZIANO

1. Introduzione

Il LiDAR (Light Detection And Ranging) rappresenta da più di due decenni uno strumento fondamentale per lo studio dei paesaggi archeologici offrendo la possibilità di rilevare la morfologia del terreno e quindi anche eventuali attività antropiche superstiti in corrispondenza di aree caratterizzate da vegetazione boschiva (Bewley 2005; Opitz, Cowley 2012; Evans *et al.* 2013; Opitz 2016; Canuto *et al.* 2018; Estrada-Belli *et al.* 2023). Se in molte regioni dell'Europa centro-settentrionale e in ambiti extra europei l'adozione del LiDAR ha prodotto risultati molto significativi e ormai consolidati nello studio di paesaggi forestali, nel Mediterraneo la diffusione di applicazioni efficaci risulta storicamente più limitata e disomogenea. Ciò dipende in larga misura da fattori strutturali: la densità e la persistenza della vegetazione sclerofilla, la presenza di un sottobosco compatto e la frequente sottigliezza dei microrilievi antropici riducono la probabilità di intercettare il suolo e aumentano l'ambiguità interpretativa delle superfici modellate (Doneus *et al.* 2015, 2022; Opitz 2016).

In questo quadro, un nodo metodologico cruciale è rappresentato dalla qualità del dato, intesa come densità di campionamento, parametri di acquisizione e controllo completo del processo di rilevamento. I dataset LiDAR tradizionali acquisiti da piattaforma aerea con densità dell'ordine di 1-2 pt/m² si sono rivelati molto spesso insufficienti per affrontare in modo sistematico l'archeologia sotto chioma in ambiente mediterraneo, consentendo, nel migliore dei casi, il riconoscimento di macro-evidenze o di forme molto marcate prevalentemente situate sulla sommità di alture (Opitz 2016; Fontana 2022). Studi sperimentali e applicazioni recenti mostrano invece come incrementi significativi della densità, combinati con la scelta mirata dei parametri di sensore quota e velocità di volo, geometria delle strisciate, stagione di acquisizione, possano migliorare drasticamente la leggibilità del terreno sotto chioma e la capacità di individuare evidenze archeologiche (Opitz, Cowley 2012; Doneus *et al.* 2022). In parallelo, l'aumento esponenziale dei volumi di dati prodotti da rilievi ad alta densità rende sempre più centrale il ricorso a pipeline di processamento strutturate e a metodi di classificazione semantica automatica per ridurre rumore, separare ground/non-ground e supportare l'analisi interpretativa su scala territoriale (Mazzacca *et al.* 2022).

All'interno di questa cornice metodologica si inserisce il progetto PRIN "Hidden Landscapes of Latium" (HiLL), che nasce con l'obiettivo di affrontare una delle principali lacune conoscitive della costa laziale a S del Tevere: la

Tenuta presidenziale di Castelporziano. Quest'area, con l'annessa Tenuta di Capocotta, ha un'estensione di 6039 ettari (ca. 60 km²) ed è caratterizzata da un'eccezionale continuità storica e ambientale, oggi in netto contrasto con un corridoio costiero profondamente trasformato nel corso del Novecento da urbanizzazione, infrastrutture e sfruttamento agricolo intensivo (Liverani 2015, 2021). La Tenuta conserva un mosaico geomorfologico costiero complesso, sistemi dunari olocenici, depressioni interdunali, bacini lagunari interrati e piscine stagionali, la cui evoluzione è strettamente connessa alle dinamiche della foce del Tevere e alla progradazione costiera, oggetto di importanti studi geoarcheologici e paleoambientali (Arnoldus-Huyzendveld 2005; Bellotti *et al.* 2007; Rendell *et al.* 2007; Bicket *et al.* 2009; Salomon *et al.* 2012; Claridge, Rendell 2013). Dal punto di vista storico-topografico, Castelporziano occupa una posizione strategica tra Ostia e Ficana a NO e *Lavinium* a SE, connessa alla rete viaria antica (via Laurentina e via Severiana) e a sistemi insediativi e cultuali di lunga durata, dal popolamento protostorico sulle dune costiere fino al paesaggio imperiale delle ville e al *Vicus Augustanus Laurentium*, cui seguono trasformazioni tardoantiche e altomedievali legate al passaggio di proprietà e alla gestione ecclesiastica (Guaitoli 1981; Claridge 1985, 1998, 2002; Brandizzi Vittucci 1998; Lauro, Claridge 1998; De Francesco 2004; Jaia 2012; Jaia, Molinari 2012; Coarelli 2018; Liverani 2021). Nonostante l'elevato potenziale archeologico, la ricerca estensiva è stata finora fortemente limitata dalla copertura forestale e dalla sostanziale impossibilità di applicare ricognizioni sistematiche sul terreno; al tempo stesso, proprio tale copertura ha contribuito a proteggere un palinsesto archeologico e geomorfologico in condizioni di conservazione eccezionali rispetto alle aree circostanti.

Il progetto HiLL intende superare questa asimmetria conoscitiva attraverso un approccio integrato basato sull'implementazione di un sistema informativo geografico (GIS), fotointerpretazione di immagini aeree storiche (RAF 1943-44; Volo Base 1954), indagini geofisiche e un rilievo LiDAR. La caratteristica fondamentale del rilievo consiste nell'altissima risoluzione finalizzata all'analisi del paesaggio sotto chioma, con densità media di ca. 350 pt/m². Il rilievo è stato realizzato con l'obiettivo di produrre modelli digitali del terreno che consentano l'identificazione di micro-topografie antropiche, infrastrutture, partizioni agrarie, paleoalvei, bacini e potenziali approdi interni al sistema dunare (Opitz 2016; Campana 2018). In tal senso, Castelporziano costituisce un banco di prova particolarmente sfidante per valutare la trasferibilità di pipeline e criteri interpretativi sviluppati in altri contesti mediterranei, come Roselle: non un semplice ampliamento geografico, ma un caso "limite" in cui scala dell'acquisizione, densità della vegetazione e complessità geomorfologica richiedono adattamenti metodologici e una riflessione critica su processing, classificazione e validazione dei risultati.

2. Castelporziano: contesto storico, ambientale e stato della ricerca archeologica

Il territorio di Castelporziano costituisce uno dei contesti costieri meglio conservati dell'Italia centrale e rappresenta un caso di studio di eccezionale rilevanza per l'archeologia del paesaggio mediterraneo. Situata lungo il litorale tirrenico a S di Roma, tra le foci del Tevere e del Numico, l'area oggi compresa nella Tenuta presidenziale di Castelporziano si configura come un raro esempio di paesaggio costiero rimasto sostanzialmente immune dai processi di urbanizzazione, bonifica e intensificazione agricola che hanno profondamente trasformato il litorale romano nel corso del XX secolo (Liverani 2015, 309-324). Questa condizione di eccezionale conservazione è il risultato di una lunga continuità di tutela istituzionale, iniziata con l'acquisizione dell'area da parte della Casa Savoia nel XIX secolo e proseguita, dopo il 1946, con la destinazione a Riserva Presidenziale della Repubblica Italiana (De Francesco 2004; Liverani 2021). Dal punto di vista ambientale, Castelporziano è caratterizzata da una copertura forestale continua che interessa oltre i tre quarti della superficie complessiva dell'area. Il paesaggio vegetazionale è dominato da macchia mediterranea sempreverde, boschi misti e ampie estensioni di lecceta matura, con settori che presentano caratteristiche riconducibili a forme di bosco vetusto (Claridge 2021).

Analisi ecologiche e dati di uso del suolo indicano una notevole stabilità delle coperture vegetali almeno dalla metà del XX secolo, con una continuità che ha favorito la conservazione non solo degli ecosistemi forestali, ma anche delle forme micro-topografiche e delle tracce archeologiche associate. Questa integrità ambientale rende Castelporziano un caso pressoché unico nel panorama del litorale laziale e, più in generale, mediterraneo. Il quadro geomorfologico del territorio è il risultato di una complessa evoluzione olocenica legata alla dinamica del delta del Tevere. Il paesaggio si articola in una successione di cordoni dunari paralleli alla linea di costa, separati da depressioni interdunali che in antico ospitavano ambienti lagunari e zone umide alimentate da acque meteoriche e di falda. Studi geoarcheologici e paleoambientali hanno evidenziato fasi multiple di progradazione costiera, con un'intensificazione dei processi sedimentari in età romana, probabilmente connessa all'aumento dell'erosione nei bacini interni e allo sfruttamento agricolo intensivo del territorio (Arnoldus-Huyzendveld 2005; Bellotti *et al.* 2007). Le dune più antiche, oggi stabilizzate dalla copertura forestale, costituiscono elementi chiave per la comprensione della distribuzione degli insediamenti antichi, offrendo superfici leggermente rialzate, ben drenate e idonee alla frequentazione umana (Rendell *et al.* 2007; Bicket *et al.* 2009).

Su questo articolato mosaico ambientale si innesta una lunga e complessa storia di occupazione antropica. Le testimonianze più antiche risalgono

alla tarda età del Bronzo e alla prima età del Ferro, quando una serie di insediamenti e aree di attività si sviluppò lungo i cordoni dunari interni, sfruttando la prossimità di ambienti lagunari ricchi di risorse (Pisani Sartorio, Quilici Gigli 1984; Fenelli, Jaia 2007). In questo sistema costiero, Castelporziano si inserisce come parte di una rete più ampia che comprende siti come Piscina Torta e Camposelva, mentre verso l'interno il grande centro protostorico di Decima/*Solonium* svolgeva un ruolo di nodo territoriale tra costa e hinterland (Guaitoli 1981; Coarelli 2018).

Con l'affermazione del controllo romano sul *Latium Vetus*, in particolare dopo la fine della guerra latina nel 338 a.C., il litorale laurentino assunse un'importanza strategica crescente per il controllo delle rotte costiere e dei collegamenti tra Roma e i centri dell'Italia tirrenica (Jaia, Molinari 2012). Tuttavia, è solo tra la tarda età repubblicana e l'inizio dell'età imperiale, quando la linea di costa si stabilizzò in modo più duraturo, che il territorio di Castelporziano conobbe una fase di intensa strutturazione insediativa (Claridge 2021). In questo periodo si sviluppò un articolato sistema di ville marittime ed extraurbane, allineate lungo il crinale dunare e collegate dalla via Severiana, l'asse viario costiero che univa Ostia a Terracina (Brandizzi Vittucci 1998). All'interno di questo quadro si colloca il *Vicus Augustanus Laurentium*, un centro semi-urbano la cui evoluzione architettonica e topografica appare strettamente legata alle dinamiche di progradazione del delta tiberino. Le ricerche hanno individuato almeno due principali fasi edilizie, una di età giulio-claudia e una severiana, quest'ultima sviluppatasi in parte su terreni di recente formazione (Claridge 1998, 2002). A N del *vicus* si colloca il grande complesso della villa imperiale di Tor Paterno, caratterizzato da strutture residenziali, impianti termali e imponenti opere di contenimento costiero, oggi in gran parte erose (Claridge 1998; Liverani 2021). La tradizione letteraria, in particolare le *Epistulae* di Plinio il Giovane, offre un parallelo fondamentale per la comprensione di questi paesaggi aristocratici costieri (Plin., *Ep*. II, 17). A partire dal III sec. d.C., una combinazione di fattori ambientali e socio-economici contribuì a una progressiva contrazione dell'occupazione lungo la fascia costiera, con fenomeni di impaludamento, diffusione della malaria e riorganizzazione dei sistemi fondiari (Sadori *et al*. 2007). In età tardoantica e altomedievale, molte delle proprietà imperiali passarono sotto il controllo di istituzioni ecclesiastiche, dando origine a grandi complessi fondiari come la *domusculta* di *Laurentum* (De Francesco 2004; Liverani 2021).

In questa fase, l'uso del territorio si orientò prevalentemente verso attività silvo-pastorali, favorendo una conservazione di lungo periodo delle strutture e delle forme del paesaggio antico. La storia della ricerca archeologica a Castelporziano riflette questa complessità, ma è al tempo stesso segnata da forti discontinuità. Le prime indagini, di carattere antiquario, risalgono al XVIII

e XIX secolo e si concentrarono sui grandi complessi monumentali visibili lungo la costa, in particolare le ville marittime e Tor Paterno (Claridge 1985; Lauro, Claridge 1998). Scavi condotti nei primi decenni del Novecento portarono alla luce ambienti decorati e strutture di elevato pregio architettonico, ma rimasero puntuali e scarsamente documentati secondo standard moderni, con molte aree rapidamente riassorbite dalla vegetazione. Una svolta significativa si ebbe nella seconda metà del XX secolo con la realizzazione della carta archeologica del litorale laurentino, che integrò dati di scavo, analisi topografiche, cartografia storica e fotografia aerea (Lauro, Claridge 1998). A partire dagli anni Duemila, ricerche geoarcheologiche e paleoambientali hanno ulteriormente raffinato il quadro interpretativo, chiarendo il ruolo determinante delle dinamiche geomorfologiche nella localizzazione e trasformazione degli insediamenti (Rendell *et al.* 2007; Claridge, Rendell 2013). Nonostante questi progressi, l'interno della Tenuta di Castelporziano è rimasto in larga parte inesplorato dal punto di vista archeologico. La copertura forestale estremamente densa rende impraticabili le tradizionali ricognizioni di superficie, mentre il regime di tutela istituzionale ha limitato l'avvio di indagini invasive e di archeologia preventiva. Di conseguenza, ampie porzioni del territorio conservano un potenziale archeologico elevatissimo ma ancora in gran parte sconosciuto.

3. Metodologia

3.1 *Acquisizione dei dati LiDAR*

La fase di acquisizione del dato LiDAR rappresenta un momento decisivo nella costruzione della conoscenza archeologica, in particolare in contesti caratterizzati da copertura forestale persistente e micro-topografie, essa è stata concepita come parte integrante del processo interpretativo e non come una semplice operazione preliminare. Nel caso di Castelporziano, l'estensione dell'area di studio e l'eccezionale densità della vegetazione mediterranea hanno reso necessario un disegno di acquisizione specificamente calibrato, volto a massimizzare la probabilità di intercettazione del suolo sotto chioma e a garantire una lettura affidabile delle micro-topografie antropiche.

L'esperienza maturata nel contesto di Roselle, dove acquisizioni LiDAR ad altissima densità da piattaforma UAV avevano dimostrato la possibilità di superare i limiti tradizionali dell'archeologia under-canopy in ambiente mediterraneo (Mazzacca *et al.* 2022; Cirigliano *et al.* 2025), ha costituito il riferimento metodologico per la progettazione della campagna di Castelporziano. Tuttavia, le condizioni operative e normative sommate alla straordinaria grandezza dell'area in esame, hanno reso impraticabile l'impiego di piattaforme UAV, imponendo il ricorso a una piattaforma aerea con equipaggio. L'acquisizione LiDAR è stata pertanto realizzata mediante



Fig. 1 – Sistema di acquisizione LiDAR aerotrasportato, impiegato per il rilievo della Tenuta presidenziale di Castelporziano. Il payload è costituito da laser scanner RIEGL VUX-120, unità inerziale Applanix APX-20 e camera fotogrammetrica Phase One iXM100 con obiettivo RSM 35 mm, installati su piattaforma aerea.

piattaforma aerotrasportata tradizionale, equipaggiata con un sensore LiDAR RIEGL VUX-120 di nuova generazione ad altissima frequenza di emissione (Fig. 1), scelto per la sua capacità di operare efficacemente in contesti forestali complessi. Il sensore consente la registrazione di eco multiple per ciascun impulso laser, caratteristica fondamentale per aumentare la probabilità di penetrazione della copertura vegetale e per migliorare il campionamento della superficie del terreno in presenza di macchia mediterranea densa e sottobosco compatto. Il progetto di volo è stato definito con l'obiettivo esplicito di ottenere una densità di acquisizione eccezionalmente elevata, sull'intera estensione della Tenuta. In media sono stati raccolti ca. 350 punti per m², una qualità nettamente superiore agli standard dei rilievi LiDAR regionali o nazionali.

La pianificazione delle strisciate di volo ha previsto un'elevata sovrapposizione longitudinale e trasversale, finalizzata a incrementare la ridondanza dei ritorni laser e a ridurre l'effetto delle zone d'ombra generate sia dalla morfologia dunare sia dalla struttura tridimensionale della vegetazione. La scelta del periodo di acquisizione è stata quella di febbraio 2024 per le condizioni stagionali favorevoli in termini di biomassa fogliare, al fine di migliorare ulteriormente la percentuale di ritorni utili dalla superficie del terreno. Il risultato della campagna di acquisizione è un dataset LiDAR di dimensioni e densità senza precedenti per un contesto costiero mediterraneo italiano, che costituisce uno dei più estesi rilievi ad altissima risoluzione mai

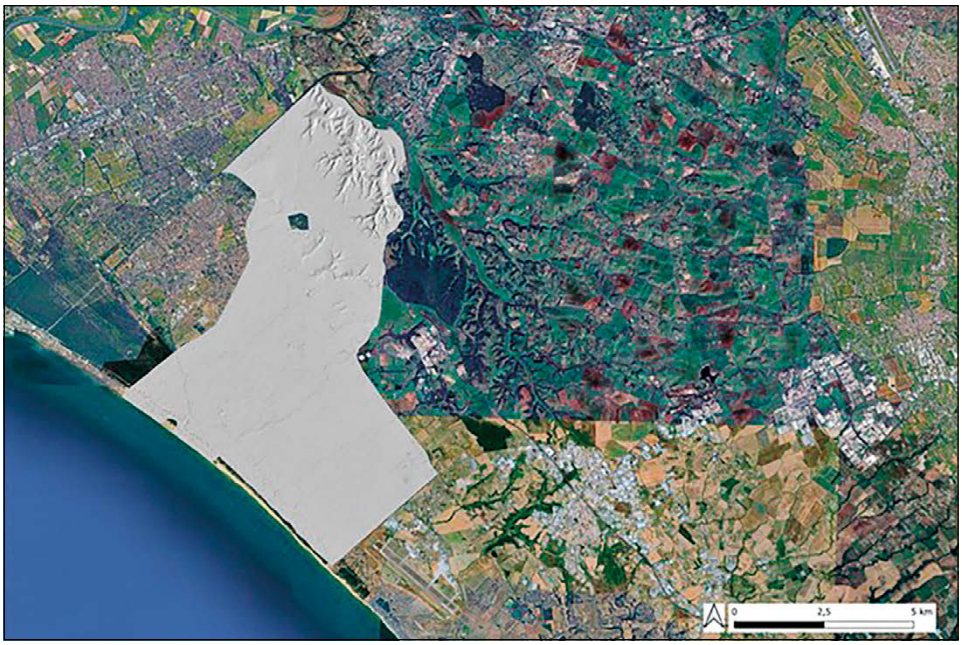


Fig. 2 – L'immagine mostra il DTM hillshade risultante dai 60 km² di acquisizione presso la Tenuta di Castelporziano.

realizzati a fini archeologici nel Mediterraneo (Fig. 2). Come già evidenziato in recenti contributi metodologici basati sugli stessi casi studio di Roselle e Castelporziano, la qualità dell'acquisizione rappresenta il prerequisito fondamentale per qualsiasi successiva fase di processing, classificazione semantica e interpretazione archeologica, in particolare quando l'obiettivo è la ricostruzione di paesaggi complessi e fortemente mascherati dalla vegetazione (Cirigliano *et al.* 2025).

3.2 *Processing*

Uno dei fattori determinanti nella generazione di un Digital Feature Model (DFM), un modello del terreno (DTM) che integra anche le evidenze archeologiche conservatesi in alzato (Pingel *et al.* 2015; Štular *et al.* 2021) è il processo di filtraggio e classificazione della nuvola di punti. Questa operazione condiziona direttamente la conservazione delle evidenze archeologiche sia in superficie sia nel microrilievo all'interno del modello finale. In questo senso, la maggior parte degli specialisti si affida a una vasta serie di algoritmi messi a disposizione da software commerciali e open-source per l'estrazione dei DTM (Axelsson 2000; Zangh *et al.* 2003, 2016; Chen *et al.* 2017); poco

è stato pubblicato riguardo al processo di generazione di DFM specifici per l'ambito archeologico (Doneus *et al.* 2020; Štular *et al.* 2021). La maggior parte degli algoritmi disponibili presenta una serie di limitazioni dovute alla rigidità nell'impostazione dei loro parametri di processing che, specialmente in ambienti complessi, caratterizzati da dislivelli improvvisi e da un tipo di vegetazione molto eterogenea, rischiano di generare troppo rumore a livello superficiale o all'opposto di tagliare evidenze archeologiche presenti in alzato. Per evitare ciò, è possibile suddividere la nuvola in classi di interesse (*terreno*, *vegetazione* e *struttura*) tramite un'operazione denominata segmentazione semantica. Questa operazione però, se effettuata manualmente, richiederebbe un enorme investimento di lavoro in termini di ore e persone, e risulterebbe irrealizzabile nel caso di estese aree boschive; perciò, un approccio automatico è in questi casi necessario.

La metodologia utilizzata per processare i dati dell'area della Tenuta di Castelporziano si basa sullo sfruttamento delle potenzialità dell'Intelligenza Artificiale e in particolare delle recenti innovazioni nell'ambito del Machine Learning per automatizzare questa operazione e generare un DFM. Basandosi sull'esperienza positiva maturata nell'ambito trentino e toscano (Mazzacca *et al.* 2022), la metodologia è stata inoltre aggiornata e appositamente adattata all'ambito specifico, con l'intento di evidenziare il maggior numero di strutture archeologiche nascoste all'interno della densa copertura boschiva di Castelporziano.

Per il processing della nuvola di punti è stato adottato un approccio Multi-Level Multi-Resolution (MLMR) (Teruggi *et al.* 2020), che suddivide il processo di segmentazione semantica su più livelli a risoluzione crescente, creando modelli di deep learning specifici per ogni passaggio (Fig. 3). Nel caso di Castelporziano, al primo livello la rete neurale è stata allenata per generare un modello predittivo finalizzato a mappare le classi *terreno* e *non-terreno* in un ambiente difficoltoso per questo tipo di processing. La Tenuta, infatti, è caratterizzata dalla presenza sia di vegetazione bassa che di alberi ad alto fusto, elementi che complicano notevolmente l'operazione di filtraggio. Successivamente, al secondo livello, il processo sfrutta un modello di deep learning allenato per distinguere le classi *struttura* e *vegetazione* a partire dalla nuvola estratta dalla classe *non-terreno*. Questa distinzione si basa sull'evidente differenza geometrica tra queste due classi, che permette una classificazione relativamente affidabile.

Rispetto alle intenzioni iniziali, si è tuttavia preferito non procedere con un terzo livello di segmentazione, originariamente pensato per suddividere le strutture in archeologiche e non archeologiche. Tale scelta è motivata principalmente dalla necessità di evitare la perdita di strutture archeologiche durante questo passaggio. Inoltre, sussiste la difficoltà di definire a priori quando una struttura possa essere definita archeologica o meno in termini

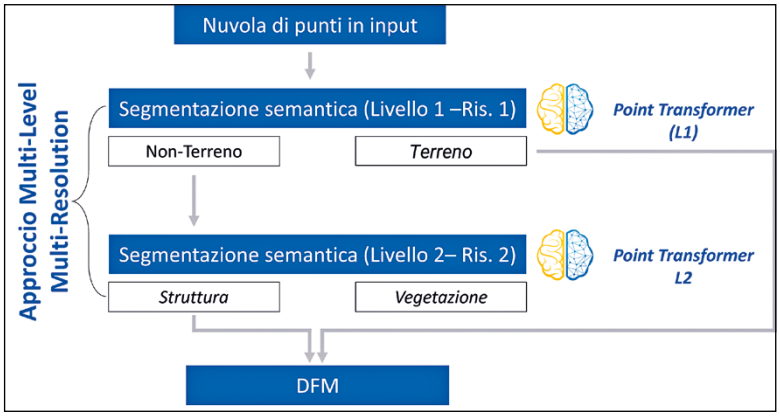


Fig. 3 – Schema del flusso di lavoro.

geometrici. Questo tipo di distinzione, infatti, richiede considerazioni di natura stilistico-interpretativa e valutazioni sullo stato di conservazione, aspetti difficili da tradurre in parametri utilizzabili per l'allenamento di una rete neurale. A ciò si aggiunge la scarsa rappresentazione della classe *struttura* nel dataset, fattore che rende l'individuazione delle strutture archeologiche e la loro divisione da quelle moderne un'operazione più efficace se svolta a livello individuale da parte di un esperto, piuttosto che attraverso l'allenamento di una rete neurale predisposta per tale operazione. Detto questo, l'individuazione di una definizione di struttura "archeologica" e "moderna" in termini comprensibili a una rete neurale rimane argomento di necessario approfondimento per future ricerche.

Per entrambi i livelli è stato necessario creare dataset di training mediante l'annotazione manuale della nuvola di punti da parte di un operatore esperto, fornendo così degli esempi su cui l'algoritmo possa basarsi per imparare a effettuare la segmentazione correttamente. Tale approccio costituisce un esempio di apprendimento supervisionato, metodologia caratteristica del Machine Learning. Per consentire all'algoritmo di distinguere correttamente le classi d'interesse, le etichette delle classi vengono associate sia ai valori registrati dal sensore (riflettanza, numero di ritorni, numero del ritorno, etc.), sia alle caratteristiche geometriche della nuvola calcolate tramite l'analisi delle componenti principali (PCA) (Weinmann *et al.* 2015), permettendo così al modello di apprendere a svolgere correttamente la segmentazione.

Per l'operazione di segmentazione è stata impiegata l'architettura Point Transformer (Zhao *et al.* 2021), una rete neurale che sfrutta meccanismi di self-attention per l'analisi di nuvole di punti. La nuvola annotata è stata suddivisa in un'area di *training* e in un'area di *validation*, utilizzate

rispettivamente per l'allenamento della rete e per la verifica della sua capacità di generalizzazione su dati non visti. Durante la fase di *training*, la rete è stata ottimizzata su entrambe le aree, selezionando il modello che ha ottenuto i migliori risultati sull'area di *validation* per effettuare la segmentazione semantica dell'intero dataset.

Sfruttando le relazioni gerarchiche implicite tra le classi, questa metodologia permette di ottimizzare le prestazioni mediante un approccio multi-risoluzione: la nuvola viene sotto-campionata a 50 cm di risoluzione al primo livello, mentre al secondo livello si opera a risoluzione maggiore (30 cm) per focalizzarsi sull'individuazione delle strutture. Tale strategia alleggerisce la fase di processing durante il primo livello, quando la nuvola presenta ancora tutte e tre le classi, riservando la massima risoluzione solo dove necessario. Oltre a questo vantaggio computazionale, il sotto-campionamento produce anche una regolarizzazione della distribuzione dei punti, evitando così eccessive differenze nei valori delle feature geometriche calcolate tra aree dove la nuvola è più rada e aree dove essa è maggiormente densa. È importante sottolineare che tale sotto-campionamento non compromette affatto l'importanza di acquisire dati ad alta risoluzione, dato che il primo obiettivo dell'acquisizione ad alta definizione consiste nella penetrazione all'interno di aree caratterizzate da vegetazione estremamente fitta. Data l'estensione e l'alta densità di punti dell'area di studio, l'intera operazione di processing è stata condotta suddividendo la nuvola in 272 tile di 500 m per lato, permettendo di gestire efficientemente le risorse computazionali e di parallelizzare l'elaborazione.

Al termine del processo di segmentazione, i risultati sono stati interpolati sulla nuvola alla risoluzione originale e sono stati generati tre raster a una risoluzione di 20 cm utilizzando l'interpolatore IDW (inverse distance weighting), uno degli interpolatori più indicati in ambito archeologico per la sua capacità di ottenere risultati accurati senza eccessivi problemi di prestazioni (Štular *et al*. 2023). I prodotti generati comprendono il DTM, ottenuto dall'interpolazione dei punti della classe *terreno*; il DSM della classe *struttura*; e un modello combinato (DFM) contenente sia le strutture che il terreno.

4. Risultati e sviluppi futuri

I risultati ottenuti in aree selezionate e note mostrano risultati incoraggianti per quanto riguarda l'applicazione di questa metodologia al caso di Castelporziano. Le metriche mostrate in Tab. 1, comunemente impiegate nell'ambito del machine learning riportano i risultati ottenuti durante la fase di *training* e calcolati sulla parte di *validation*.

Le metriche dimostrano in generale una buona performance dell'algoritmo nella distinzione delle classi *terreno* e *vegetazione*, che presentano

%	Terreno	Vegetazione	Struttura
Precision	97.15	99.64	88.73
Recall	99.24	99.22	77.41
F1 score	98.19	99.43	82.69
Overall Accuracy = 99.01 %			

Tab. 1 – Metriche calcolate in base ai risultati della predizione del modello sul set di validazione.

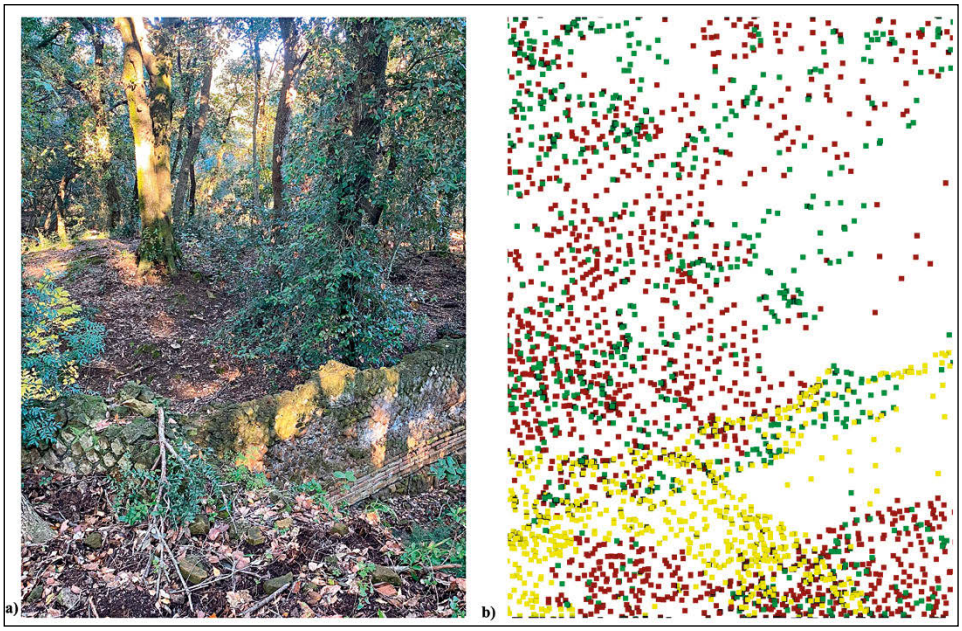


Fig. 4 – Esempio di evidenza archeologica (a) e corrispettivo sulla nuvola di punti (b). Nell'immagine (b) è possibile vedere i punti identificati come strutture in giallo, ground in marrone e vegetazione in verde.

rispettivamente valori di F1 score del 98,19% e del 99,43%. Tale risultato è in linea con le aspettative, data la chiara differenza nelle caratteristiche geometriche delle due classi. La classe *struttura* invece risulta la più problematica: nonostante un livello di precisione dell'88,73%, il valore di Recall (77,41%) indica che quasi un quarto dei punti attribuibili alla stessa non sono stati individuati. Questo può essere attribuito al fatto che la classe, già di difficile discriminazione a causa della densa vegetazione, risulta essere altamente sottorappresentata all'interno del dataset. Un problema costante dell'intero processing dell'area di Castelporziano consiste nella tipologia e nella densità della copertura vegetale (Fig. 4), che in alcuni casi blocca la maggior parte

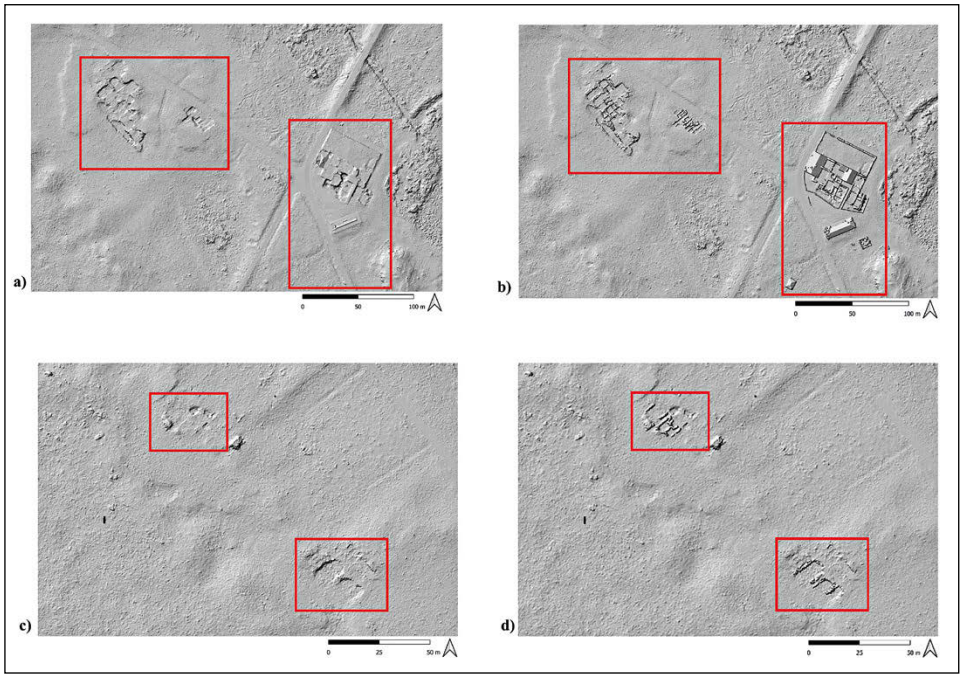


Fig. 5 – a) c) DTM ombreggiato con evidenze poco visibili; b) d) DFM ombreggiato con strutture ben delineate.

degli impulsi del sensore LiDAR, non permettendo di ottenere un'accurata rappresentazione di ciò che è sottostante. In queste situazioni, sia l'Intelligenza Artificiale che l'operatore umano esperto faticano a distinguere le strutture dalle altre classi. Si possono evidenziare due tipologie di casistiche: una in cui la superficie sottostante è rappresentata nella nuvola di punti, ma risulta così adiacente alla vegetazione che il discrimine tra le due diventa difficile da individuare; l'altra, in cui la densità della vegetazione, specialmente di tipo arbustivo, blocca completamente il segnale, non permettendo la documentazione della superficie sottostante.

Passando all'osservazione qualitativa sul DFM (Fig. 5), è possibile notare la differenza nella visualizzazione di aree contenenti strutture archeologiche note, con o senza l'inclusione della classe *struttura* nell'interpolazione IDW, evidenziando l'utilità dell'inclusione di questa classe insieme al terreno nel delineare le strutture archeologiche presenti nel modello finale e documentare evidenze che altrimenti andrebbero perse. Ciononostante, come evidenziato dalle metriche, alcune strutture non vengono mappate dall'algoritmo. Al di fuori delle metriche, però, maggiori informazioni potranno essere ottenute

solo dalla validazione tramite ricognizioni a terra, che permetterà di quantificare ulteriormente l'efficacia del metodo e di identificare eventuali pattern sistematici negli errori di classificazione, contribuendo al miglioramento futuro dell'approccio.

Accanto a questi risultati quantitativi e metodologici, le prime analisi del DTM ad altissima risoluzione consentono alcune osservazioni preliminari di carattere morfologico e archeologico. Anche in settori caratterizzati da macchia mediterranea sempreverde e sottobosco particolarmente compatto, il modello digitale del terreno restituisce una micro-topografia del suolo di qualità sensibilmente superiore rispetto a precedenti esperienze LiDAR in ambito mediterraneo basate su densità di acquisizione standard. Il dato permette una lettura continua della struttura del paesaggio. Complessivamente, l'analisi e la lettura in ambiente GIS dei (DFM) prodotti hanno consentito, e stanno tuttora consentendo, in una fase di interpretazione in progress, l'individuazione di un numero significativo di tracce riconducibili ad attività antropiche. Tra le evidenze finora sottoposte a verifica preliminare si segnalano strutture interpretabili come carbonaie, resti edilizi riferibili a complessi insediativi e produttivi (inclusi settori attribuibili alle ville costiere), tracciati viari e sistemi di organizzazione agraria del suolo.

Nel loro insieme, tali elementi delineano un paesaggio intensamente strutturato, la cui formazione sembra riconducibile a una lunga e articolata sequenza di interventi antropici sviluppatisi nel corso di un ampio arco cronologico. Questi risultati preliminari mostrano come, nonostante le forti limitazioni imposte dalla copertura vegetale, l'integrazione tra acquisizione LiDAR ad altissima densità, classificazione semantica e analisi critica dei modelli derivati consenta di accedere a una dimensione del record archeologico finora largamente inaccessibile a Castelporziano. La validazione sistematica tramite ricognizioni sul terreno, prevista nelle fasi successive del progetto, sarà essenziale per confermare l'interpretazione delle anomalie individuate, quantificare in modo più accurato l'efficacia del metodo e individuare eventuali pattern ricorrenti negli errori di classificazione, contribuendo al perfezionamento futuro dell'approccio.

5. Conclusioni

Il caso di studio di Castelporziano conferma, già in una fase preliminare di analisi, come l'impiego del LiDAR ad altissima risoluzione rappresenti oggi uno degli strumenti più efficaci per affrontare le criticità dell'archeologia del paesaggio negli ambienti boschivi del mediterraneo (Opitz 2016; Doneus *et al.* 2022). In un territorio che per oltre un secolo è rimasto ai margini della ricerca estensiva a causa dell'impossibilità di applicare metodologie tradizionali di ricognizione, il rilievo LiDAR ha reso nuovamente leggibile un paesaggio

archeologico altrimenti invisibile, fornendo una base informativa solida su cui costruire nuove ipotesi interpretative.

I risultati preliminari mostrano con chiarezza che, in contesti strutturalmente complessi come quello di Castelporziano, la fase di acquisizione del dato non costituisce un momento neutro, ma rappresenta uno spartiacque, una scelta fondamentale. La possibilità di ottenere modelli digitali del terreno capaci di restituire micro-topografie sotto chioma è direttamente legata alla densità del campionamento, alla progettazione del rilievo e al controllo dell'intero processo di acquisizione (Opitz, Cowley 2012; Doneus *et al*. 2022). In assenza di tali condizioni, gran parte delle evidenze qui individuate sarebbe rimasta indistinguibile dal rumore topografico o completamente occultata dalla vegetazione. Il confronto con il caso studio di Roselle evidenzia come le pipeline metodologiche sviluppate in un contesto mediterraneo fortemente antropizzato e stratificato possano essere trasferite, con opportuni adattamenti, a un ambiente radicalmente diverso per scala, copertura vegetale e grado di conservazione (Mazzacca *et al*. 2022; Cirigliano *et al*. 2025).

Castelporziano si configura così non come una semplice applicazione estensiva di metodologie già sperimentate, ma come un caso di studio estremo, capace di mettere in discussione assunti, soglie operative e strategie interpretative comunemente adottate nell'uso del LiDAR in archeologia mediterranea. Castelporziano emerge come un laboratorio privilegiato per l'archeologia del paesaggio mediterraneo non solo per l'eccezionale stato di conservazione del territorio, ma anche per la scala dell'area indagata, ca. 60 km², e per la mole di dati prodotta, che rappresenta una delle più estese acquisizioni LiDAR mai realizzate a fini archeologici in ambito mediterraneo. Tale dimensione rende il caso studio straordinario e al tempo stesso particolarmente complesso dal punto di vista della gestione, del processamento e dell'interpretazione dell'informazione, evidenziando la necessità di strategie metodologiche robuste e di un controllo critico continuo del dato lungo l'intera catena conoscitiva.

Giuseppe Prospero Cirigliano
Scuola IMT, Alti studi Lucca
giuseppe.cirigliano@imtlucca.it

Gabriele Mazzacca, Fabio Remondino
3D Optical Metrology Unit, Bruno Kessler Foundation (FBK), Trento
gmazzacca@fbk.eu, remondino@fbk.eu

Stefano Campana
Laboratory of Landscape Archaeology and Remote Sensing (LAP&T),
Dipartimento di Scienze Storiche e dei Beni Culturali, Università degli Studi di Siena
stefano.campana@unisi.it

BIBLIOGRAFIA

Arnoldus-Huyzendveld A. 2005, *The natural environment of the Agro Portuense*, in S. Keay, L. Paroli (eds.), *Portus. An Archaeological Survey of the Port of Imperial Rome*, «Archaeological Monographs of the British School at Rome», 15, 14-30.

Axelsson P. 2000, *DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models*, «International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing», 33, 4, 110-117.

Bellotti P., Caputo C., Davoli L., Evangelista S., Garzanti E., Pugliese F., Valeri P. 2007, *Late Quaternary landscape evolution of the Tiber River delta plain (central Italy)*, «Zeitschrift für Geomorphologie», 51, 505-534.

Bewley R.H. 2005, *Aerial archaeology: The first century*, in J. Bourgeois, M. Meganck (eds.), *Aerial Photography and Archaeology 2003*, «Archaeological Reports Ghent University», 4, 15-30.

Bicket A.R., Claridge A., Rendell H.M., Rose J. 2009, *Holocene coastal evolution of the Laurentine Shore (central Italy): Integrating geomorphology, archaeology and chronology*, «The Holocene», 19, 7, 1023-1036.

Brandizzi Vittucci P. 1998, *Considerazioni sulla via Severiana*, «Mélanges de l'École Française de Rome. Antiquité», 110, 2, 929-993.

Campana S. 2018, *Mapping the Archaeological Continuum. Filling "Empty" Mediterranean Landscapes*, Cham, Springer.

Canuto M.A., Estrada-Belli F., Garrison T.G., Houston S.D., Acuña M.J., Kováč M., Marks J., Nondédéo P., Auld-Thomas L., Castanet C., Chatelain D., Chiriboga C.R., Drápela T., Lieskovský T., Tokovinine A., Velasquez A., Fernández-Díaz J.C., Shrestha R. 2018, *Ancient lowland Maya complexity as revealed by airborne laser scanning of northern Guatemala*, «Science», 361 (6409), eaau0137.

Chen Z., Gao B., Devereux B. 2017, *State-of-the-art: DTM generation using airborne LiDAR data*, «Sensors», 17, 1, 150.

Cirigliano G.P., Mazzacca G., Remondino F., Liverani P., Cantoro G., Maschner H., Campana S. 2025, *Drone-based high-resolution LiDAR for under-canopy archaeology in Mediterranean environments: The Rusellae case study (Italy)*, «Archaeological Prospection», 32, 3, 644-655 (https://doi.org/10.1002/arp.1980).

Claridge A. 1985, *Il Vicus Augustanus e le ville del Laurentino*, in M.G. Lauro (ed.), *Castelporziano I, Campagna di scavo e restauro 1984*, Roma, Viella Editrice, 71-78.

Claridge A. 1998, *Il Vicus Augustanus Laurentium*, in M.G. Lauro (ed.), *Castelporziano III, campagne di scavo e restauro 1987-1991*, Roma, Viella Editrice, 115-136.

Claridge A. 2002, *The Vicus Augustanus at Laurentum*, in O. Brandt, P. Attema (eds.), *Centralization and Urbanization in Roman Italy*, «Journal of Roman Archaeology», Suppl. 43, 89-101.

Claridge A. 2021, *Il Vicus Augustanus e il paesaggio costiero del Laurentino*, in AA.VV., *II sistema ambientale della Tenuta presidenziale di Castelporziano. Ricerche sulla complessità di un ecosistema forestale costiero mediterraneo*, 3, Roma, Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, 889-992.

Claridge A., Rendell H.M. 2013, *The Laurentine shore in antiquity*, in S. Keay (ed.), *Rome, Portus and the Mediterranean*, «Archaeological Monographs of the British School at Rome», 21, 161-176.

Coarelli F. 2018, *Solonium*, «Mélanges de l'École Française de Rome. Antiquité», 130, 1, 283-287.

De Francesco D. 2004, *La proprietà fondiaria nel Lazio (IV-VIII secolo)*, Roma, Edizioni Quasar.

Doneus M., Briese C., Fera M., Janner M. 2015, *Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning*, «Journal of Archaeological Science», 51, 94-103.

Doneus M., Mandlburger G., Doneus N. 2020, *Archaeological ground point filtering of airborne laser scan derived point-clouds in a difficult Mediterranean environment*, «Journal of Computer Applications in Archaeology», 3, 1, 92-108.

Doneus M., Banaszek Ł., Verhoeven G.J. 2022, *The impact of vegetation on the visibility of archaeological features in airborne laser scanning datasets from different acquisition dates*, «Remote Sensing», 14, 4, 858.

Estrada-Belli F., Gilabert-Sansalvador L., Canuto M.A., Šprajc I., Fernández-Díaz J.C. 2023, *Architecture, wealth and status in Classic Maya urbanism revealed by airborne LiDAR mapping*, «Journal of Archaeological Science», 157, 105835.

Evans D.H., Fletcher R.J., Pottier C., Chevance J.-B., Soutif D., Tan B.S., Im S., Ea D., Tin T., Kim S., Cromarty C., De Greef S., Hanus K., Bâty P., Boornazian G. 2013, *Uncovering archaeological landscapes at Angkor using LiDAR*, «Proceedings of the National Academy of Sciences», 110, 31, 12595-12600.

Fenelli M., Jaia A.M. 2007, *Camposelva*, in C. Belardelli (ed.), *Repertorio dei siti protostorici del Lazio*, Borgo S. Lorenzo (FI), All'Insegna del Giglio, 235-237.

Fontana G. 2022, *Italy's hidden hillforts: A large-scale LiDAR-based mapping of Samnium*, «Journal of Field Archaeology», 47, 4, 245-261.

Guaitoli M. 1981, *Castel di Decima. Nuove osservazioni sulla topografia dell'abitato alla luce dei primi saggi di scavo*, «Quaderni dell'Istituto di Topografia Antica», 9, 117-150.

Jaia A.M. 2012, *Il santuario di Sol Indiges e il controllo del litorale laurentino*, «Ostraka», 21, 599-615.

Jaia A.M., Molinari M.C. 2012, *Il santuario di Sol Indiges e il sistema viario costiero*, in G. Ghini, M. Zaccaria (eds.), *Lazio e Sabina* 8, *Atti del Convegno. Ottavo Incontro di Studi sul Lazio e la Sabina (Roma 2011)*, Roma, Edizioni Quasar, 163-174.

Lauro M.G., Claridge A. 1998, *Il litorale laurentino: carta archeologica della zona di Castelporziano,* in M.G. Lauro (ed.), *Castelporziano III, campagne di scavo e restauro 1987-1991*, Roma, Viella Editrice, 39-61.

Liverani P. 2015, *La costa laziale. Lagune, scali, santuari: un confronto*, in V. Di Cola, F. Pitzalis (eds.), *Materiali per Populonia*, 11, Pisa, Edizioni ETS, 309-324.

Liverani P. 2021, *La costa a sud di Roma tra Tardo-Antico e Alto Medioevo*, in AA.VV., *II sistema ambientale della Tenuta presidenziale di Castelporziano. Ricerche sulla complessità di un ecosistema forestale costiero mediterraneo*, 3, Roma, Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, 959-974.

Mazzacca G., Grilli E., Cirigliano G.P., Remondino F., Campana S. 2022, *Seeing among foliage with LiDAR and machine learning: Towards a transferable archaeological pipeline*, «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 46, 365-372.

Opitz R.S. 2016, *An overview of airborne and terrestrial laser scanning in archaeology*, in S. Campana, R. Scopigno (eds.), *Digital Methods and Remote Sensing in Archaeology*, Cham, Springer, 13-31.

Opitz R.S., Cowley D.C. 2012, *Interpreting archaeological topography: Lasers, 3D data, observation, visualisation and applications*, in R.S. Opitz, D.C. Cowley (eds.), *Interpreting Archaeological Topography*, Oxford, Oxbow Books, 1-12.

Pisani Sartorio G., Quilici Gigli S. 1984, *Trovamenti arcaici nel territorio laurentino*, «Bullettino della Commissione Archeologica Comunale di Roma», 89, 9-26.

Pingel T.J., Clarke K., Ford A. 2015, *Bonemapping: A LiDAR processing and visualization technique in support of archaeology under the canopy*, «Cartography and Geographic Information Science», 42 (suppl. 1), 18-26.

Rendell H.M., Claridge A., Clarke M.L. 2007, *Late Holocene Mediterranean coastal change along the Tiber Delta and Roman occupation of the Laurentine shore, central Italy*, «Quaternary Geochronology», 2, 83-88.

Sadori L., Giardini M., Masi A. 2007, *Il paesaggio urbano e suburbano della Roma imperiale*, «Atti della Società dei Naturalisti e Matematici di Modena», 138, 253-270.

Salomon F., Goiran J.-P., Bravard J.-P., Arnaud P., Kay S. 2012, *The Canale di Comunicazione Traverso at Portus: A geoarchaeological approach to Roman harbour environments*, «Géomorphologie: relief, processus, environnement», 1, 75-90.

Štular B., Lozić E., Eichert S. 2021, *Airborne LiDAR-derived digital elevation model for archaeology*, «Remote Sensing», 13, 9, 1855.

Štular B., Lozić E., Eichert S. 2023, *Interpolation of airborne LiDAR data for archaeology*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 48, 103840.

Teruggi S., Grilli E., Russo M., Fassi F., Remondino F. 2020, *A hierarchical machine learning approach for multi-level and multi-resolution 3D point cloud classification*, «Remote Sensing», 12, 16, 2598.

Weinmann M., Jutzi B., Hinz S., Mallet C. 2015, *Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers*, «ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing», 105, 286-304.

Zhang K., Chen S.-C., Whitman D., Shyu M.-L., Yan J., Zhang C. 2003, *A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LiDAR data*, «IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing», 41, 4, 872-882.

Zhang W., Qi J., Wan P., Wang H., Xie D., Wang X., Yan G. 2016, *An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation*, «Remote Sensing», 8, 6, 501.

Zhao H., Jiang L., Jia J., Torr P.H.S., Koltun V. 2021, *Point Transformer*, in *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 16259-16268.

ABSTRACT

This paper reports preliminary outcomes of the Hidden Landscapes of Latium project, applied to the Presidential Estate of Castelporziano, an exceptionally well-preserved coastal landscape in the central Mediterranean and, concurrently, a highly challenging forested context for landscape archaeology. The study area, about 60 km², characterized by dense and continuous vegetation cover, was surveyed by airborne LiDAR acquisition at very high point density (in average 350 pts/m²), with the goal to facilitate under-canopy archaeological detection in a highly challenging Mediterranean environments. We provide a critical appraisal of the acquisition strategy, with particular attention to sampling density and flight design as determinative factors for the detection of subtle anthropogenic micro-topographies. The acquired dataset was subjected to a semantic-segmentation processing pipeline that integrates multi-level and multi-resolution machine-learning techniques for the automated classification of ground, vegetation, and structural elements. Results indicate that the combination of archaeologist-addressed, high-resolution LiDAR acquisition and advanced semantic classification substantially enhance the interpretability of forested archaeological landscapes and enables the identification of features previously obscured by vegetation. Castelporziano thus constitutes a valuable testbed for evaluating the applicability, transferability, and limitations of LiDAR-based methodologies within Mediterranean landscape archaeology.