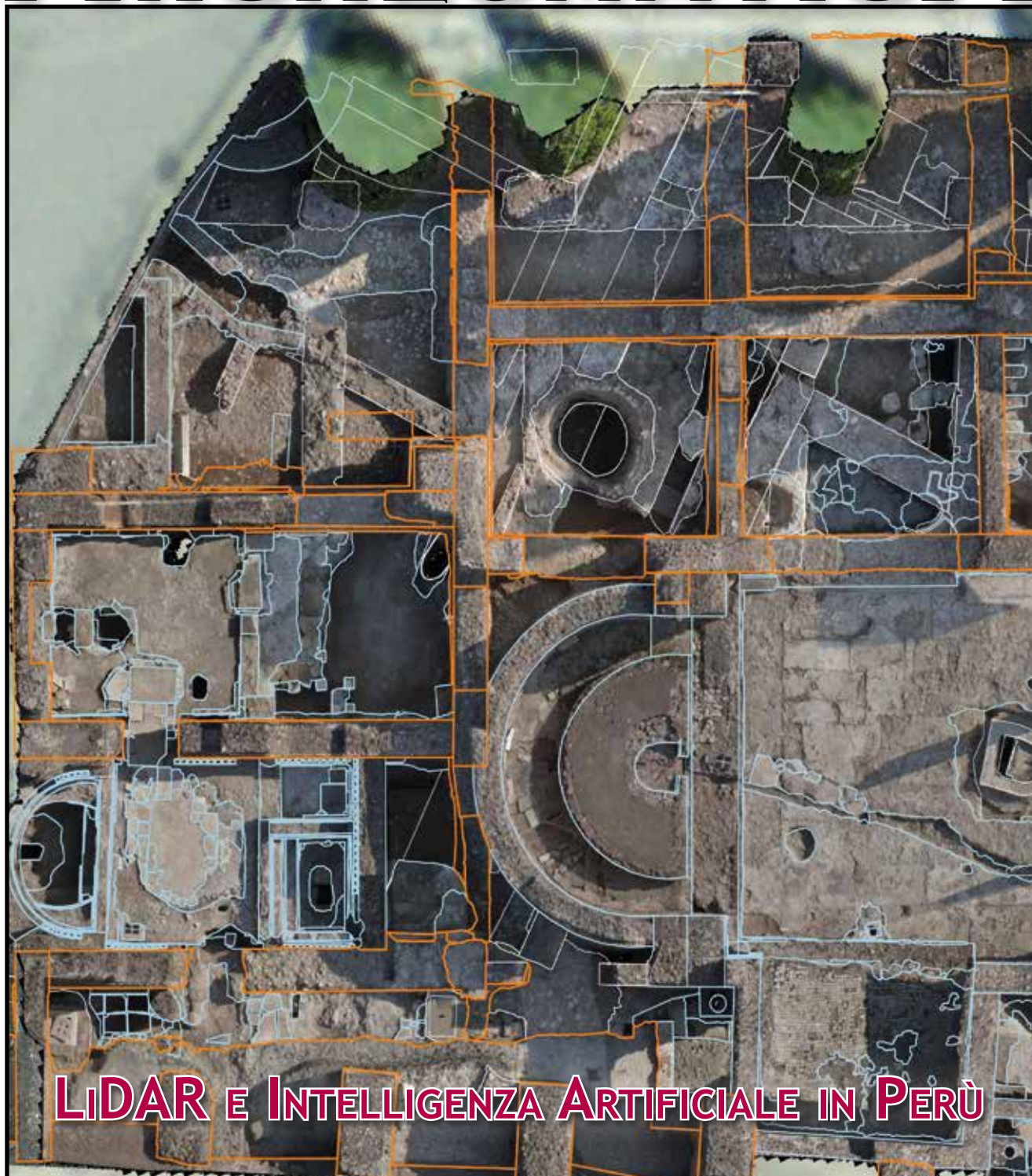


ARCHEOMATICA



LIDAR E INTELLIGENZA ARTIFICIALE IN PERÙ

UN SISTEMA INTEGRATO PER LA DOCUMENTAZIONE ARCHEOLOGICA

MICROTOMOGRAFIA DI UNO STRUMENTO ANTICO

ANALISI DELLE RISORSE LITOLOGICHE

IN QUESTO NUMERO



In copertina l'immagine del GIS intra-site della documentazione prodotta dalle indagini archeologiche presso le pendici nord-orientali del Palatino.

RIVELAZIONI

6 Sotto le Nuvole, sotto la Foresta : applicazioni Tecnologiche Lidar e di Intelligenza Artificiale per Nuove prospettive nel Sito monumentale di Kuelap - Perù

DI GIOVANNI RIGHETTI, STEFANO SERAFINI, FABIAN BRONDI RUEDA, WARREN CHURCH, GABRIELE GARNERO



DOCUMENTAZIONE

14 Un Sistema Integrato per la Gestione e la Rielaborazione in Ambiente Tridimensionale della Documentazione Prodotta dalle Indagini Archeologiche presso le Pendici Nord-orientali del Palatino

DI EMANUELE BRIENZA, LORENZO FORNACIARI



SEGUI L'ACCOUNT DI @ARCHEOMATICA SU TWITTER, FACEBOOK E INSTAGRAM

ARCHEOMATICA
TECNOLOGIE PER I BENI CULTURALI
ANNO XI, N° 1 - GENNAIO 2020

Archeomatica, trimestrale pubblicata dal 2009, è la prima rivista italiana interamente dedicata alla divulgazione, promozione e interscambio di conoscenze sulle tecnologie per la tutela, la conservazione, la valorizzazione e la fruizione del patrimonio culturale italiano ed internazionale. Pubblica argomenti su tecnologie per il rilievo e la documentazione, per l'analisi e la diagnosi, per l'intervento di restauro o per la manutenzione e, in ultimo, per la fruizione legata all'indotto dei musei e dei parchi archeologici, senza trascurare le modalità di fruizione avanzata del web con il suo social networking e le periferiche "smart". Collabora con tutti i riferimenti del settore sia italiani che stranieri, tra i quali professionisti, istituzioni, accademia, enti di ricerca e pubbliche amministrazioni.

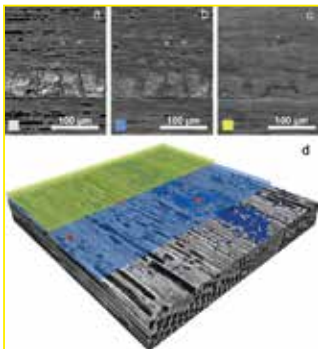
DIRETTORE
RENZO CARLUCCI
DIR@ARCHEOMATICA.IT

DIRETTORE RESPONSABILE
MICHELE FASOLO
MICHELE.FASOLO@ARCHEOMATICA.IT

COMITATO SCIENTIFICO
ANNALISA CIPRIANI, MAURIZIO FORTE,
BERNARD FRISCHER, GIOVANNI ETTORE GIGANTE,
SANDRO MASSA, MARIO MICHELI, STEFANO MONTI,
FRANCESCO PROSPERETTI, MARCO RAMAZZOTTI,
ANTONINO SAGGIO, FRANCESCA SALVEMINI,
RODOLFO MARIA STROLLO

REDAZIONE
REDAZIONE@ARCHEOMATICA.IT

GIOVANNA CASTELLI
GIOVANNA.CASTELLI@ARCHEOMATICA.IT
LICIA ROMANO
LICIA.ROMANO@ARCHEOMATICA.IT
VALERIO CARLUCCI
VALERIO.CARLUCCI@ARCHEOMATICA.IT
DOMENICO SANTARSIERO
DOMENICO.SANTARSIERO@ARCHEOMATICA.IT
LUCA PAPI
LUCA.PAPI@ARCHEOMATICA.IT



22 L'analisi Stratigrafica dello Strumento Antico: un Approccio Microtomografico

DI TOMMASO ROVETTA, GIACOMO FIOCCO, MICHELA ALBANO, CLAUDIA INVERNIZZI, GABRIELE NATALE LANZAFAME, ALESSANDRO RE



26 Analisi delle Risorse Litologiche degli Edifici Storici Fiorentini con Strumenti GIS e Proposta di un Itinerario Turistico

DI LUCIA ARGENTO

RUBRICHE

32 AZIENDE E PRODOTTI

Soluzioni allo Stato dell'Arte

36 AGORÀ

Notizie dal mondo delle Tecnologie dei Beni Culturali

37 EVENTI

INSERZIONISTI

3DTARGET	2
ARCHIMETER	39
BMTA	40
CODEVINTEC	38
D-SITE	31
STONEX	35
SKYLAB STUDIOS	21

una pubblicazione

mediaGEO
Science & Technology Communication

DIFFUSIONE E AMMINISTRAZIONE
TATIANA IASILLO
DIFFUSIONE@ARCHEOMATICA.IT

MEDIA GEO SOC. COOP.
VIA PALESTRO, 95
00185 ROMA
TEL. 06.64.87.12.09
FAX. 06.62.20.95.10
WWW.ARCHEOMATICA.IT

PROGETTO GRAFICO E IMPAGINAZIONE
DANIELE CARLUCCI
DANIELE@ARCHEOMATICA.IT

EDITORE
MEDIA GEO SOC. COOP.
Archeomatica è una testata registrata al Tribunale di Roma con il numero 395/2009 del 19 novembre 2009
ISSN 2037-2485

STAMPA
SYSTEM GRAPHIC SRL
VIA DI TORRE SANTA ANASTASIA 61 00134 ROMA

CONDIZIONI DI ABBONAMENTO

La quota annuale di abbonamento alla rivista è di € 45,00. Il prezzo di ciascun fascicolo compreso nell'abbonamento è di € 12,00. Il prezzo di ciascun fascicolo arretrato è di € 15,00. I prezzi indicati si intendono Iva inclusa. Per abbonarsi: www.archeomatica.it

Gli articoli firmati impegnano solo la responsabilità dell'autore. È vietata la riproduzione anche parziale del contenuto di questo numero della Rivista in qualsiasi forma e con qualsiasi procedimento elettronico o meccanico, ivi inclusi i sistemi di archiviazione e prelievo dati, senza il consenso scritto dell'editore.

DATA CHIUSURA IN REDAZIONE: 30 MAGGIO 2020

SOTTO LE NUVOLE, SOTTO LA FORESTA: APPLICAZIONI TECNOLOGICHE LIDAR E DI INTELLIGENZA ARTIFICIALE PER NUOVE PROSPETTIVE NEL SITO MONUMENTALE DI KUELAP - PERÚ

di Giovanni Righetti, Stefano Serafini,
Fabian Brondi Rueda, Warren Church,
Gabriele Garnerò

La società MEDS BV, azienda con sede in Olanda, ma attiva prevalentemente nelle Americhe, nel corso del Novembre 2019 ha realizzato una ripresa aerea LiDAR e fotogrammetrica nel sito archeologico di Kuelap, sulla cordigliera peruviana a circa 3000 m di quota (regione Amazonas). Sebbene il monumentale complesso di Kuelap sia immenso e sia stato probabilmente l'insediamento più popoloso della valle del fiume Utcubamba, il sito e i suoi occupanti non sono descritti in alcun documento conosciuto lasciato dai primi coloni spagnoli. Di conseguenza, e nonostante gli approfonditi studi archeologici, rimangono irrisolte importanti questioni riguardanti il ruolo politico, economico e religioso di Kuelap nella regione. Il lavoro ha il supporto logistico dell'IGN, *Instituto Geográfico Nacional* del Perú, e si avvale della collaborazione dell'Antropologo Warren Church, specialista delle culture andine antiche ed esperto di archeologia della regione in studio.



Fig. 1 - L'ambiente andino nei pressi di Kuelap.

I CHACHAPOYA

Nel 1000 d.C., il primo impero andino Wari aveva iniziato a ritirare la sua presenza culturale dagli altipiani settentrionali del Perú, abbandonando le loro caratteristiche enclavi monumentali. Le loro caratteristiche costruzioni architettoniche erano costruite in pietra e presentavano una pianta ortogonale circondata da alte e diritte mura. Solo recentemente gli archeologi hanno iniziato a riconoscere le impronte architettoniche di Wari sul paesaggio e ad apprezzare l'estensione della sua vasta influenza culturale lontano dalla loro capitale politica nella regione dell'altopiano meridionale di Ayacucho (Guengerich e Church, 2018, Watanabe 2012, 2016).

La natura dell'espansione di Wari e le sue motivazioni sono discusse dagli archeologi, ma la cronologia dello sviluppo regionale mostra chiaramente che, al nord come al sud, la contrazione di Wari è stata accompagnata da diffusi spostamenti demografici, riallineamenti socio-politici e dalla nucleazione di comunità che costruirono abitazioni in muratura di pietra sulle cime delle montagne e sulle alte

creste circa 500 anni prima della conquista Inca (ca. 1470 d.C.). Il periodo intermedio andino successivo (1000 - 1450 d.C.) si caratterizza come un periodo di crescita demografica, di crescente centralizzazione politica in siti più grandi e difendibili e di aumento dei conflitti (Parsons e Hastings 1988; Covey 2008; Arkush 2006).

A Est dell'altopiano centro-settentrionale e attraverso il fiume Marañon sulla cordigliera andina orientale, dove gli altipiani andini incontrano le foreste pluviali dell'Amazzonia superiore, una tendenza simile di costruire insediamenti con mura di pietra era iniziata anche nell'area di cultura archeologico-etnostorica popolarmente conosciuta come Chachapoyas.

Si sa molto poco degli abitanti precolombiani della regione (chiamati collettivamente *Chachapoya*), anche se, durante l'occupazione imperiale Inca della regione avvenuta dopo il 1470 d.C., erano complessivamente, circa 300.000 (Lerche, 1995).

Il loro numero crollò rapidamente quando gli Inca deportarono grandi gruppi di Chachapoya a seguito di ripetute ribellioni: maschi in età guerriera furono arruolati nella guerra civile Inca, e ancora una volta da conquistadores spagnoli che combattevano per sottomettere gli Inca. Conflitti interni, abusi da parte dei signori spagnoli e, soprattutto, malattie di origine europea hanno spazzato via, secondo le stime, il 92% dei Chachapoya (Cook, 1981) entro la metà del XVII secolo.

I primi coloni spagnoli in questo angolo sempre più remoto e scarsamente abitato delle Ande non hanno mostrato alcun interesse a scrivere sulle culture native; la maggior parte di ciò che sappiamo della cultura Chachapoya deriva da un testo che descrive i ricordi d'infanzia di Padre Blas Valera che è stato conservato e pubblicato da Garcilaso de la Vega (1609), ma che non è privo di inesattezze (Church e Guengerich, 2018).

Nei secoli successivi, le fitte foreste andine tropicali tipiche dei pendii scoscesi e piovosi sopra il bacino amazzonico nasconderanno un numero sorprendente di insediamenti di pietra in rovina di Chachapoya, molti dei quali presentano proporzioni monumentali e case riccamente decorate con sculture litiche. La città coloniale di Chachapoyas, nella regione dell'Amazzonia, ha subito secoli di abbandono sotto il dominio coloniale e poi repubblicano, ma la notizia di straordinari resti archeologici, in particolare l'immensa "fortezza" chiamata Kuelap, si è diffusa dopo che un magistrato della città ha indagato su una disputa su terreni rinvenuti e ha descritto l'insediamento monumentale ora noto come "La Fortaleza" nel 1843.

La notizia dell'imponente monumento con le mura esterne che raggiungono i 20 metri di altezza cominciò ad attirare sporadiche visite da parte di avventurieri e naturalisti europei del XIX secolo come Antonio Raimondi ed Ernst Middendorf.

A circa 3000 m, Kuelap si trova sulla cima di un'impor-



Fig. 2 - Lo strumento di rilievo.

tante montagna chiamata *La Barreta* che domina la valle del fiume Utcubamba. Le alte pareti di La Fortaleza racchiudono una prominente cresta e immense quantità di terra e roccia utilizzate per creare una piattaforma lunga quasi 700 metri in direzione Nord-Sud e larga circa 150 metri da Est a Ovest. Anche se la cima della montagna fu occupata per la prima volta nel 400 d.C. circa, il periodo di costruzione monumentale coincide con il Periodo Tardo-Intermedio.

I resti di circa 400 abitazioni circolari in pietra che caratterizzano gli insediamenti Chachapoya coprono una superficie stimata in sette ettari e sono divisi in "barrios" inferiori e superiori da un'ulteriore piattaforma terrazzata all'estremità settentrionale.

La Fortaleza non solo offre una vista completa della val-



Fig. 3 - Lo stato di copertura superficiale dei resti delle costruzioni.

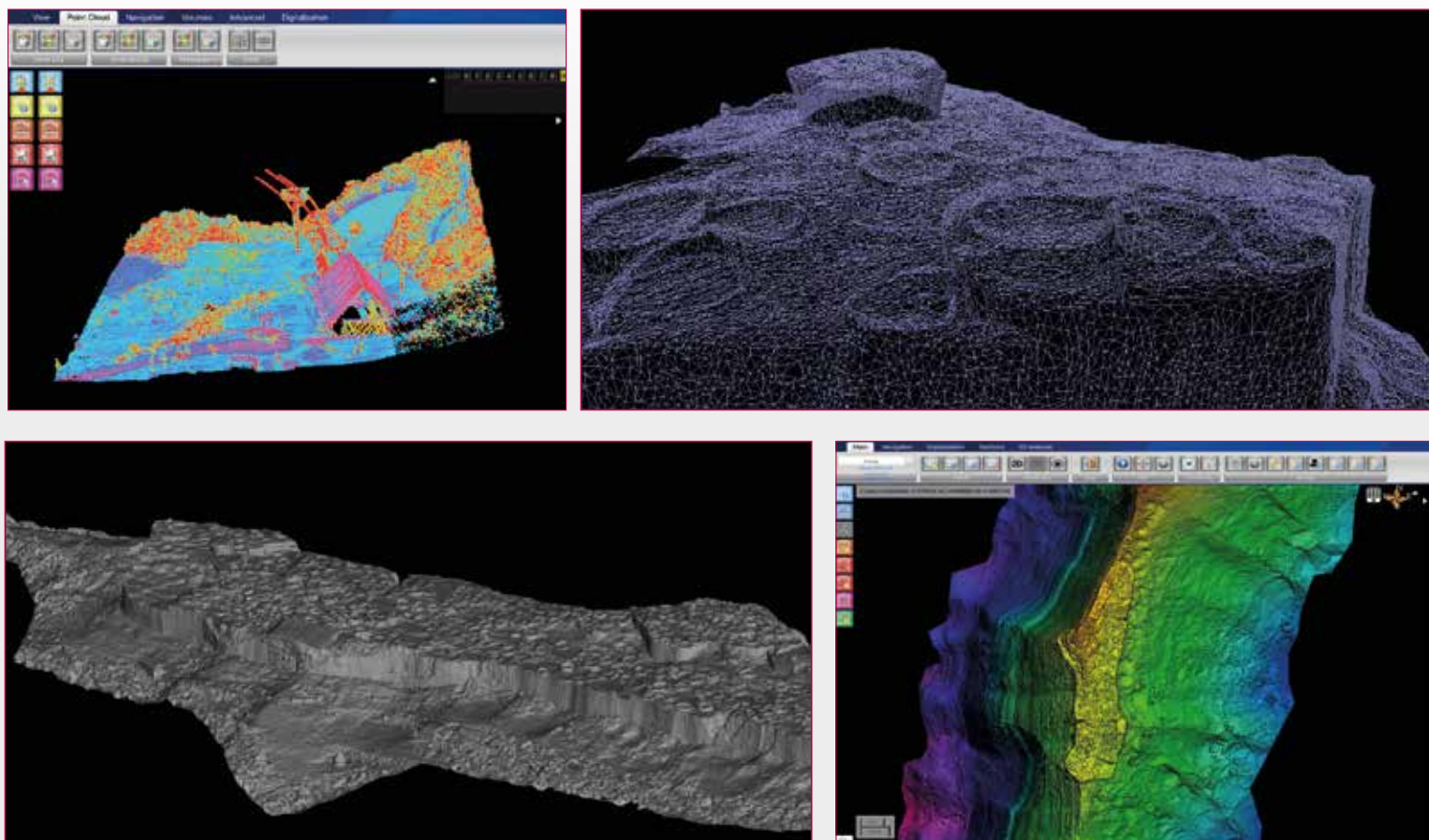


Fig. 4 - Rappresentazioni della nuvola di punti e della mesh.

le del fiume Utcubamba che taglia il cuore della regione di Chachapoyas, ma può essere vista dalla maggior parte dei siti archeologici conosciuti in tutta la valle ad Est, forse come simbolo visivo di sfida nei confronti delle società nemiche tradizionali.

Kuelap rimane impareggiabile non solo per le sue dimensioni, ma anche per il numero di domande che pone sui suoi costruttori nella mente degli studiosi e del crescente numero di turisti che oggi visitano il sito come il fulcro della fiorente industria turistica locale.

Dal punto di vista ambientale, sulla base dello studio dell'ecosistema del Ministero dell'Ambiente peruviano, la Zona Archeologica Monumentale di Kuelap si trova su un *Bosque Altimontano* (pluviale) di *Yunga*, ecosistema forestale di alta montagna situato sulle pendici orientali delle Ande tra i 2500 e i 3800 m s.l.m., con una fisiografia estremamente aspra.

Si tratta di una foresta con una copertura chiusa, con un massimo di tre strati distinguibili. L'altezza del baldacchino raggiunge i 10-15 metri, con alcuni alberi emergenti di 20 metri. I livelli di ricchezza floristica sono elevati. Presenza di abbondanti epifite. Nel confine limite con la *Puna* o il *Páramo* e la *Jalca* è la formazione di foresta nana (2 o 3 metri di altezza), conformata da *Ericáceas*, *Solanáceas*, *Asteráceas*, *Polemoniáceas* e altre. In relazione agli indici climatici e alla disposizione delle aree secondo la classificazione climatica di Thornthwaite, quest'area presenta un clima temperato molto piovoso, caldo, molto umido, con inverno secco e piogge abbondanti durante tutto l'anno, permanentemente umido a causa dell'alta concentrazione di vapore acqueo nell'atmosfera.

Il clima di questa regione è determinato dall'anticiclone dell'Atlantico meridionale e dalla bassa pressione equatoriale, legata alla zona di convergenza intertropicale. Queste zone sono anche caratterizzate da essere molto instabili (la temperatura diminuisce con l'altitudine): la temperatura media annuale dall'estate all'inverno è di 27° C e nei periodi freddi scende a 10° C; la variazione della temperatura oraria è percepibile e l'atmosfera è molto calda a mezzogiorno e calda di notte (Fig. 1).

L'ESPLORAZIONE DI KUELAP

A partire dalla metà e fino al termine del XX secolo, i resti archeologici in tutto questo vasto paesaggio sono stati purtroppo sempre più scoperti e lasciati esposti a causa delle migrazioni verso Est e dalla deforestazione per stabilire l'agricoltura e l'allevamento (Schjellerup 2005). I siti scoperti dai coloni sono stati danneggiati e vandalizzati, la regione è stata presa di mira per saccheggi e traffici di antichità a partire dal 1997, quando è venuto alla luce un ricco sito mortuario posto nelle scogliere sopra la Laguna de los Condores (Lago dei Condor) (Von Hagen, 2002).

Gli antichi insediamenti e le tombe Chachapoyas vengono oggi solitamente saccheggiati prima ancora che gli archeologi e le autorità di polizia vengano a conoscenza della loro esistenza.

Gli archeologi sono ora consapevoli che questa regione era tutt'altro che "remota" durante l'epoca pre-ispánica (Church, 1996): gran parte del paesaggio delle regioni amministrative peruviane di *Amazonas*, *La Libertad* e soprattutto *San Martín* ospitano ancora grandi insediamenti e cimiteri nascosti sotto fitte foreste pluvia-



Fig. 5 - Rappresentazione della mesh texturizzata generata a partire dalla nuvola di punti LiDAR, con sovrapposizione del filtraggio della sola vegetazione da LiDAR.

li, minacciati dall'espansione della popolazione, dalla deforestazione e dalle spedizioni di saccheggi clandestini (Church e Morales 2004). La mancanza di risorse finanziarie e umane per proteggere, studiare scientificamente e persino documentare i resti archeologici di una cultura un tempo popolosa, fiorente, ma ancora poco compresa, è sempre più vista come un tragico dilemma. Gli studi scientifici di Kuelap risalgono a oltre un secolo fa, ma sono stati pochi e sporadici fino a pochi anni or sono: il sito fu visitato per la prima volta da un antropologo professionista nel 1893, quando lo svizzero americano Adolf Bandelier documentò e mappò gran parte del luogo in condizioni di lavoro sul campo estremamente primitive.

Bandelier (1906) e una dozzina di studiosi che visitarono Kuelap a intervalli sporadici durante la maggior parte del XX secolo (Langlois, 1939; Reichlen e Reichlen, 1950) evitarono in genere le speculazioni sull'organizzazione politica dei costruttori del monumento, ma fecero invece riferimento all'unica breve descrizione pubblicata dei Chachapoyas di Garcilaso de la Vega (1619), che piuttosto ambiguamente utilizza il termine di "nazione". Tuttavia, termini eurocentrici come "civiltà" e "regno" si insinuano ancora nelle narrazioni archeologiche basandosi principalmente sull'immensità di Kuelap come misura di un chiaro dominio militare sulla regione.

Alla fine degli anni Sessanta, Ruiz Estrada ha scavato la prima sequenza stratificata completa in ceramica a Fortaleza, e il suo lavoro rimane la spina dorsale della cronologia del sito. Altrettanto significative,

ma meno apprezzate da molti archeologi, sono state le brevi descrizioni di Ruiz dei resti archeologici immediatamente circostanti la Fortaleza. Questi siti variano per dimensioni e altri aspetti, ma sono elencati come *Muralla de Malcapampa*, *La Barreta*, *Pampa Linda*, *Imperio* e *Quiúquita-Lahuancho*. Questi siti più piccoli sembrano essere collegati a La Fortaleza in base alla loro vicinanza e distribuzione sui pendii a Nord-Est e a Sud del monumento principale. Oggi sono coperti da una fitta vegetazione di foresta montana, poiché tutti gli sforzi per preparare Kuelap al turismo si sono concentrati sulla Fortaleza.



Fig. 6 - Rappresentazione della mesh texturizzata generata a partire dalla nuvola di punti LiDAR dell'edificio noto come Tintero (parte meridionale del sito).

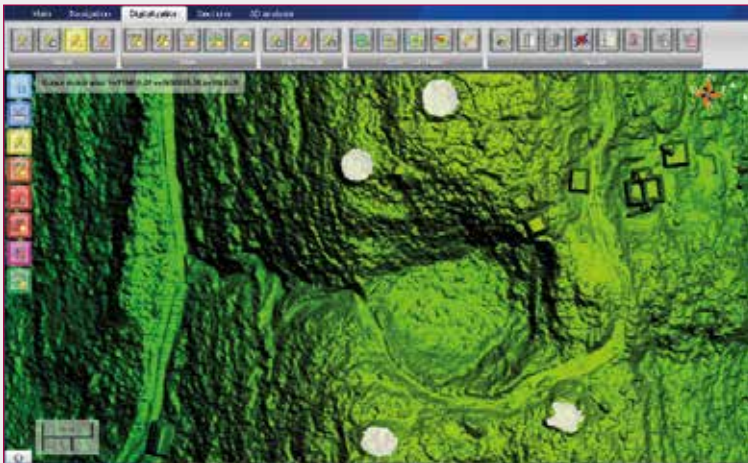


Fig. 7 - a Sx sono rappresentati gli edifici individuati dal software di IA, a Dx gli stessi edifici riportati sull'ortofotografia, dalla quale non si sarebbero potuti evidenziare.

Sulla base dell'esame di questi siti aggiuntivi, Ruiz ha stimato la dimensione dell'intero complesso urbano di Kuelap a 5 km² e il numero di costruzioni abitative a ben oltre 700. La conclusione di Ruiz che il complesso insediativo di Kuelap era "uno dei più grandi centri abitati conosciuti nella valle di Utcubamba" rimarrà probabilmente incontestata.

Tra il 1986 e il 2011, gran parte dell'architettura di Kuelap è stata intensamente scavata e il monumento di La Fortaleza è stato conservato e "ripulito", ma dall'opera sono state pubblicate solo interpretazioni prive di dati esplicitamente favorevoli, precludendo così valutazioni indipendenti da parte della più ampia comunità archeologica.

In mancanza di dati pubblicati, diverse narrazioni contrastanti che spiegano la singolarità di Kuelap sono state sostenute da diversi archeologi e persistono. L'ipotesi che Kuelap fosse il centro di un potente stato teocratico che dominava i territori ben oltre la valle di Utcubamba, presentata da Narvaez (2013, 2018), è ampiamente accettata e abbracciata dall'industria turistica.

Altri archeologi restano scettici di fronte a tali grandiose affermazioni (Guengerich e Church, 2018; Van Valkenburgh et al., 2020), probabilmente in relazione all'insufficienza dei dati pubblicati, dell'inadeguata documentazione dei siti che notoriamente abbondano nelle aree circostanti La Fortaleza e della mancanza di un quadro teorico di supporto.

Al momento di questa pubblicazione, ci sono diverse interpretazioni divergenti del significato funzionale di Kuelap e le differenze rimangono irrisolte.

Dal punto di vista amministrativo, il Ministero della Cultura ha ufficialmente approvato la *Zona Intangible del Complejo Arqueológico de Kuélap*, su una superficie di 218.33 ha.

Sono inoltre state definite una *Zona de Amortiguamiento* (su una superficie di 609.67 ha) e una ulteriore *Zona de Influencia*, che per ora non hanno un'approvazione ufficiale.

La Zona de Amortiguamiento coinvolge l'attuale popolazione del villaggio di Kuelap, compreso il settore chiamato *Pampas de Ucsul*, che ospita 85 famiglie impegnate nel lavoro agricolo.

In quest'area sono presenti diversi piccoli siti archeologici associati a campi agricoli preispanici, molti dei quali sono ancora in uso presso le popolazioni locali.

IL RILIEVO DI MEDS DEL 2019

L'area oggetto di studio risulta particolarmente impervia e, soprattutto, ampiamente ricoperta da vegetazione piuttosto fitta, cosa che di fatto ne impedisce la comprensione e l'interpretazione utilizzando esclusivamente informazioni di tipo fotogrammetrico.

Nella presente esperienza sono state implementate originali metodologie che consentono di ottenere, a partire dall'insieme dei set di dati disponibili, una mappatura fortemente automatizzata, sfruttando sia tecniche standard di elaborazione opportunamente customizzate, sia tecniche di *deep learning* per l'individuazione e classificazione delle tracce identificate.

Avvalendosi della propria strumentazione, nell'ambito di un esclusivo accordo con il locale IGN, ente gestore della cartografia nazionale peruviana, MEDS ha eseguito un rilievo LiDAR e fotogrammetrico: la strumentazione ed i parametri di acquisizione sono stati scelti in funzione delle caratteristiche ambientali dell'area oggetto di rilievo e degli scopi prefissati:

- ▶ strumento LiDAR (accuratezza 1.5 cm) equipaggiato con IMU ad alta precisione (posizionamento planimetrico 5 cm, altimetrico 10 cm, angolare 0.015° in roll e pitch, 0.035° in yaw)
- ▶ i piani di volo ed i parametri di acquisizione sono stati studiati con lo scopo di ottenere un rilievo di dettaglio che permettesse di acquisire quante più informazioni possibili anche sotto alla vegetazione, riducendo al minimo i coni d'ombra e raggiungendo ove possibile un ritorno di almeno 15 echi per ciascun impulso laser emesso. Sono state attuate le seguenti impostazioni:

- ▶ Quota di Volo: variabile dai 60 ai 100 m AGL
- ▶ Schema di Volo: voli incrociati
- ▶ Velocità di volo: 10 Kn
- ▶ PulseRate: variabile da 400 a 820 KHz in base alle caratteristiche morfologiche
- ▶ Field of View (FOV): 180°
- ▶ Revolution per second: 60 - 200 scans/sec
- ▶ Densità di punti rilevati: tra i 300 e i 400 pt/m²
- ▶ GSD riprese fotogrammetriche: 2-5 cm

L'utilizzo di una piattaforma inerziale di elevate caratteristiche di accuratezza ha determinato la possibilità di ottenere un successivo allineamento delle strisciate LiDAR con residui dell'ordine dei 2-3 cm (Fig. 2).

Il supporto da parte dell'IGN si è estrinsecato sulla base di 6 specialisti organizzati in 3 gruppi:

- ▶ gruppo di pianificazione del volo fotogrammetrico;
- ▶ gruppo pilota RPA: responsabile dell'esecuzione delle riprese fotogrammetriche;
- ▶ gruppo di geodesia: incaricata materializzazione, del rilievo e dell'elaborazione dei punti geodetici di controllo a terra.

Relativamente alle problematiche connesse con le misure topografiche, la Zona Archeologica Monumentale di Kuélap presenta cambiamenti meteorologici molto repentini, soprattutto per quanto riguarda la velocità del vento, le precipitazioni, la bassa nuvolosità e la presenza costante di nebbia.

Al fine di ottenere i migliori risultati, è stato osservato che il lasso di tempo ottimale delle condizioni meteorologiche è dalle 11 alle 14. Le caratteristiche geomorfologiche e l'altitudine dell'area hanno fatto sì che il ricevitore GNSS avesse una scarsa ricezione satellitare, per cui è stato necessario prevedere un tempo di acquisizione più lungo.

Le fasi di filtraggio e classificazione della nuvola di punti sono state eseguite utilizzando macro appositamente sviluppate nell'ambiente ATLAS (www.theatlasgis.com, di proprietà di MEDS), realizzate in ragione della particolare morfologia degli oggetti da rilevare (forte presenza di rumore in relazione all'elevata umidità sempre presente, significativa vegetazione occludente (Fig. 3), ridottissima dimensione delle costruzioni presenti, ...) (Fig. 4, 5 e 6).

APPLICAZIONI DI DEEP LEARNING PER IL RICONOSCIMENTO E L'INDIVIDUAZIONE DELLE COSTRUZIONI

È stata eseguita la produzione di DSM e DTM con risoluzione di 15 cm e dell'ortomosaico con risoluzione 5 cm. I prodotti sono stati pubblicati sul portale web ATLAS e resi disponibili agli studiosi per le analisi di dettaglio.

Nei primi mesi del 2020 abbiamo quindi iniziato una valutazione sistematica della nuova base informativa.

In una recente analisi de La Fortaleza pubblicata da Van Valkenburgh et al. (2020) non ha affrontato la sfida scoraggiante posta dalla copertura vegetale molto più densa di El Imperio, ma la loro analisi archeologica ha mostrato chiaramente il valore di raccogliere e analizzare in modo efficiente grandi quantità di dati utilizzando questo tipo di tecnologia di rilievo.

Il nostro studio è stato concepito in modo diverso perché l'obiettivo primario era quello di verificare la capacità di questa tecnologia di produrre immagini della superficie del sito: volevamo vedere se potevamo penetrare adeguatamente la vegetazione e produrre una rappresentazione della morfologia del suolo sufficientemente accurata in modo tale da identificare con sicurezza le costruzioni.

Su queste basi, utilizzate come *ground truth*, è stato implementato il software di analisi automatica del rilievo procedendo in quattro fasi distinte:

- ▶ individuazione del set di addestramento;
- ▶ apprendimento;
- ▶ test di riconoscimento;

▶ applicazione sul rilievo reale.

Nella prima fase, il rilievo della città di Kuélap è stato mappato manualmente e sono stati identificati 84 tra gli edifici presenti che il software deve imparare a riconoscere, selezionandoli in modo da coprire situazioni diversificate: resti più o meno visibili, presenza o meno di vegetazione, ecc..

Sono quindi stati identificati per ogni edificio la forma (rettangolare o circolare), centroide e dimensione approssimativa (diametro maggiore/diametro minore per gli edifici circolari o ellittici, lunghezza dei lati per gli edifici rettangolari).

In Kuélap tutti gli edifici selezionati risultano avere una dimensione inferiore ai 15 m; su tale lunghezza è stata impostata la dimensione del campione per il funzionamento del software, con un'area di ricerca pari a 30 x 30 m. Tale dimensione verrà utilizzata anche poi in ricerca, avendo l'accortezza di utilizzare sempre un *overlap* del 50% nei dati forniti all' algoritmo per avere sempre un edificio completamente all'interno di tale sezione.

Per ogni edificio (sia per l'addestramento che per la verifica) sono state estratte sezioni di rilievo LiDAR centrate sull'edificio e create delle varianti, al fine di perturbare il set di dati inserendo traslazioni e rotazioni, e alterando il set di punti con rumore casuale. Sono state così ottenute un totale di 125 varianti per ogni edificio, portando il set totale di campioni a 10500.

Gli edifici identificati sono stati divisi in due gruppi: il primo (70%) per l'addestramento delle reti neurali, il secondo (rimanente 30%) per la verifica.

Il software di deep learning, basato su *TensorFlow* (www.tensorflow.org) e implementato in C++, è stato alimentato con il set di addestramento e i progressi sono stati misurati tramite il 30% di campioni lasciati come verifica; raggiunto il livello di affidabilità e accuratezza ricercato, si è passati all'applicazione sul rilievo eseguito.

Le sezioni LiDAR ottenute sono state date all'algoritmo di riconoscimento che ha fornito per ogni campione i dati dell'edificio (o edifici) rilevati, con posizione, dimensione e orientamento. Tutti i dati sono stati raccolti ed inseriti in un database geografico per poter essere

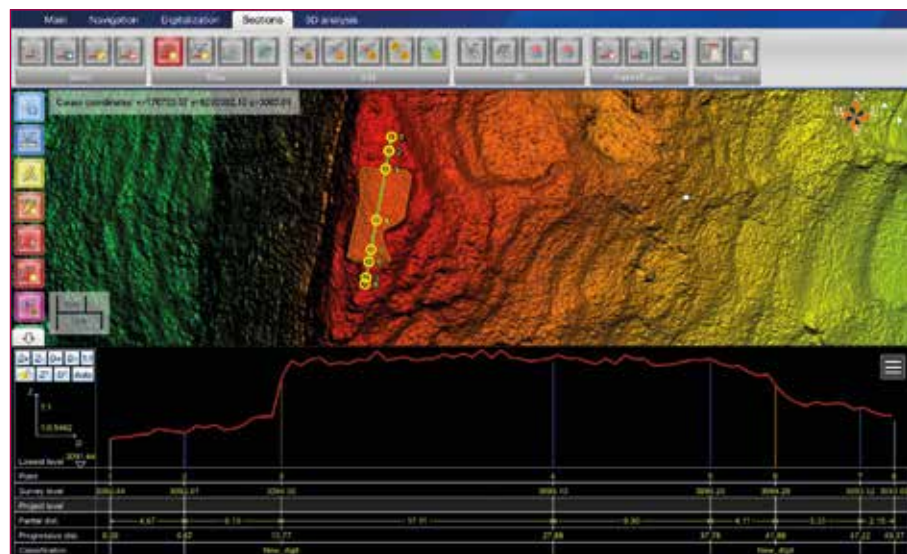


Fig. 8 - Visualizzazione dei terrazzamenti e di un manufatto su Atlas.

poi sovrapposti alle ortoimmagini per evidenziare i riscontri ottenuti (Fig. 7).

Efficaci documentazioni delle fasi di rilievo e delle elaborazioni prodotte sono visualizzabili nel filmato raggiungibile dal seguente link:

<https://youtu.be/UtaHHm3weg>.

OSSERVAZIONI E PROSPETTIVE

Nelle tradizionali osservazioni da terra gli archeologi hanno potuto osservare velocemente particolari che avrebbero richiesto ulteriori analisi nella nostra metodologia di rilievo, come ad esempio osservare tracce di intonaci e decorazioni sulle superfici dei muri.

D'altra parte, la visione di insieme concessa dalla moderna metodologia tridimensionale ha permesso di integrare le informazioni di dettaglio disponibili dalle precedenti osservazioni, cogliendone anche i limiti che l'osservazione da terra aveva determinato.

Il maggior valore della tecnologia LiDAR nella nostra analisi è la sua capacità di penetrare nella fitta foresta tropicale per identificare la presenza o l'assenza di resti archeologici. L'uso di questa tecnologia su vettori aerei con più lunghe portate è probabilmente destinato a diventare uno strumento inestimabile per le indagini preliminari del sito in aree di terreno difficili, costose e pericolose per il transito a piedi: una volta che un sito archeologico viene identificato dal LiDAR, è allora chiaro che le sue capacità completano, ma non sostituiscono, l'utilità delle tecniche di indagine a terra (Fig. 8).

Le tecniche sono complementari, ed entrambe sono necessarie per analizzare accuratamente i siti archeologici tipici degli ambienti della foresta tropicale montana. Ma chiaramente, prima di tutto, un sito deve essere "scoperto" prima di poter essere studiato.

Inoltre, la capacità di produrre una mappa accurata dall'alto, senza alcun contatto fisico, è fortemente significativa a causa dei danni che altrimenti si farebbero alla vegetazione forestale per consentire un rilievo terrestre con una Stazione Totale.

A Kuelap, la tecnologia LiDAR ha fornito la capacità di migliorare notevolmente la nostra vista e, di conseguenza, la nostra comprensione di un sito che è praticamente sempre descritto come una costruzione "monumentale solitaria ma spettacolare", priva del suo contesto archeologico circostante. Più specificamente, la tecnologia ha offerto un mezzo senza precedenti, non distruttivo, per identificare e caratterizzare in modo provvisorio peculiarità sconosciute e sottovalutate del paesaggio costruito circostante, in attesa di successive verifiche. È molto probabile che possiamo confermare l'osservazione di Ruiz che l'intero complesso insediativo di Kuelap ha quasi il doppio delle abitazioni di quanto riportato nella letteratura e nelle documentazioni turistiche.

Rivalutando La Fortaleza all'interno di un contesto allargato si potrà certamente migliorare la nostra comprensione di Kuelap come un complesso di siti multifunzionale, e non solo una fortezza come si credeva fino a non molto tempo fa. Si auspica che un'analisi più completa del complesso insediativo di Kuelap, combinata con le procedure archeologiche di superficie, fornisca un passo estremamente necessario per risolvere le controversie che circondano l'antica funzione e il significato del sito all'interno della grande regione delle Chachapoyas.

Le basi ora disponibili possono essere ora diventare il supporto per successive analisi e sviluppi:

- ▶ le corrette posizioni e ricostruzioni dei vari siti possono costituire un sicuro punto di partenza per la

viewshed analysis su scala territoriale, consentendo la comprensione della localizzazione dei vari agglomerati e cogliendo l'infrastrutturazione del territorio a livello di componente visuale;

- ▶ le difficoltà di accesso al sito, già di per sé proibitive per larghe fasce della popolazione (almeno 6 ore di auto + ½ ora di cammino in quota e in terreni scoscesi a partire dall'aeroporto di Jaén) e tragicamente enfatizzate dall'attuale emergenza sanitaria planetaria, rendono auspicabile la realizzazione sul sito e su siti simili di efficaci forme di turismo virtuale, nelle quali la conoscenza puntale del sito dal punto di vista geomorfologico può essere integrata da scientificamente corrette ricostruzioni 3D, da visualizzarsi su strumentazioni immersive di *Virtual*, *Augmented* e *Mixed Reality* (Minucciani e Garnerò, 2015 e 2017).

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori ringraziano:

- ▶ il General de Brigada Fernando PORTILLO ROMERO, Jefe del Instituto Geográfico Nacional del Perú;
- ▶ il Ministerio de Cultura del Perú.

BIBLIOGRAFIA

- Arkush, E. (2006): Collapse, conflict, conquest: The transformation of warfare in the late pre-Hispanic Andean highlands. In *The archaeology of warfare: Prehistories of raiding and conquest* edited by E. Arkush and M. Allen, pp.286-335. University Press of Florida. Gainesville.
- Bandelier, A. (1907): *The Indians and Aboriginal Ruins Near Chachapoyas in Northern Peru*. Historical Records and Studies. New York.
- Church, W. (1996): Prehistoric cultural development and interregional interaction in the tropical montane forests of Peru, doctoral thesis, Department of Anthropology, Yale University, New Haven.
- Church, W. B. and A. Guengerich (2018): Introducción: La (re)construcción de Chachapoyas a través de la historia e historiografía (1532-2000 d.C.) in *¿Qué fue Chachapoyas? Aproximaciones interdisciplinarias en el estudio de los Andes nororientales del Perú*. Boletín de Arqueología de la Pontificia Universidad Católica del Perú, Vol. 23(2): 5-38. Lima.
- Church, W.B. and R. Morales Gamarra (2004): Tomb raiders of El Dorado: conservation dilemmas on a 'new' archaeological frontier in Peru. *The SAA Archaeological Record*, 4(1):24-9.
- Cook, N. D. (2004): *Demographic Collapse: Indian Peru, 1520-1620*. Cambridge University Press.
- Garcilaso de la Vega, I. (1966 [1619]): *Royal commentaries of the Incas and general history of Peru, Part I* [traducción de H. V. Livermore]. University of Texas Press, Austin. 1966.
- Guengerich, A. (2015): Settlement organization and architecture in late intermediate period Chachapoyas, northeastern Peru. *Latin American Antiquity*, 26(3): 362-381.
- Guengerich, A. and W. Church (2018): Conclusión: Una mirada hacia el futuro: nuevas direcciones en la arqueología de los Andes nororientales, in *¿Qué fue Chachapoyas? Proximaciones interdisciplinarias en el estudio de los Andes nororientales del Perú*. Boletín de Arqueología de la Pontificia Universidad Católica del Perú 23(2): 313-334. Lima.
- Langlois, L. (1939): *Utcubamba: Investigaciones Arqueológicas en este Valle del Departamento de Amazonas*. Revista del Museo Nacional 8(2) :224-249. Lima.
- Lerche, P. (1995): *Los Chachapoya y los símbolos de su historia*, Ediciones y Servicios Gráficos César Gayoso, Lima.
- MINUCCIANI, V.; GARNERO, G. (2017): When the cultural heritage can not be physically visited, *Atti del Convegno in Volume WORLD HERITAGE and DISASTER - Knowledge, Culture and Representation, Le Vie dei Mercanti - XV Forum Internazionale di Studi, Aversa-Capri, 15-17 giugno 2017*, pagg. 508-517 (ISBN: 978-88-6542-582-4)
- MINUCCIANI, V.; GARNERO, G. (2015): Nuovi scenari di Turismo Virtuale con gli UAV (New scenes of Virtual Tourism with the UAV), *Archeomatica - Tecnologie per i Beni Culturali* (ISSN: 2037-2485), Vol. 6, n.2/2015, pagg. 28-30 [WOS:000365763200004]
- Narváez Vargas, A. (2013): Kuelap: centro del poder político religioso de los Chachapoyas, en: F. Kauffman Doig (ed.), *Los Chachapoyas*, 87-159, Banco de Crédito, Lima.
- Narváez Vargas, A. (2018): *Parque Nacional del Rio Abiseo: Memoria Viva del Paisaje Cultural Andino Amazónico*, co-authored with A. Narváez and A. Gavazzi, Apus Graph Ediciones. Lima.
- Parsons, J. R., and C. M. Hastings. (1988). "The late intermediate period." *Peruvian Prehistory* edited by R. Keating, pp. 190-229.
- Reichlen, Henry and Paule (1950): *Recherches Archeologiques dans les Andes du Haut Utcubamba*, Journal de la Societe des Americanistes, 39:219-246. Paris.
- Schjellerup, I., C. Espinoza, J. Rollefson, V. Quipuscoa, M. Kamp Sørensen and V. Peña (2009): *La Ceja de montaña: un paisaje que va desapareciendo*, Ethnographic Monographs, No. 3. National Museum of Denmark, Copenhagen.
- Ruiz Estrada, A. (2009): *Alfarería de Kuélap: tradición y cambio*, Avqi Ediciones, Lima.
- Watanabe, S. (2016): *Cronología y dinámica social durante el Periodo Wari: nuevos descubrimientos en el sitio arqueológico El Palacio, sierra norte del Perú*, en M. Giersz & K. Makowski (eds.), *Nuevas perspectivas en la organización política huari*, pp.263-285. Andes: Boletín del Centro de Estudios Precolombinos de la Universidad de Varsovia 9. Varsovia / Lima
- Van Valkenburgh, P., Cushman, K.C., Butters, L.J.C., Vega, C.R., Roberts, C.B., Kepler, C. and Kellner, J. (2020): Lasers Without Lost Cities: Using Drone Lidar to Capture Architectural Complexity at Kuelap, Amazonas, Peru, *Journal of Field Archaeology*, 45(sup1), pp. S75-S88.
- Von Hagen, A. y S. Guillén (1998): *Tombs with a view*. *Archaeology* 51(2):48-54.
- AA.VV. (2014): *Sociocultural dynamics and cultural continuity in the Peruvian northern highlands: a case study from Middle Horizon Cajamarca*. Boletín de Arqueología PUCP 16:105-130. Lima.

ABSTRACT

MEDS BV, a company based in the Netherlands but mainly active in the Americas, perform an aerial LiDAR and photogrammetric survey in November 2019 at the archaeological site of Kuelap, on the northeastern Peruvian cordillera at about 3000 m altitude (Amazonas region). Although the monumental Kuelap site complex is immense and was likely the most populous settlement in the Utcubamba river valley, the site and its occupants are not described in any known documents left by the early Spanish colonists. Consequently, and despite intensive archaeological studies, important questions regarding Kuelap's political, economic, and religious roles in the region remain unresolved. The work has the logistical support of the IGN, Instituto Geográfico Nacional of Peru, and avails itself of the collaboration of anthropologist Warren Church, a specialist in ancient Andean cultures and expert in the archaeology of the region under study.

KEYWORDS

LiDAR; PHOTOGRAMMETRY; CHACHAPOYAS; KUELAP; 3D MODEL; DEEP LEARNING

AUTHOR

GIOVANNI RIGHETTI
G.RIGHETTI@MEDSAMSTERDAM.EU

STEFANO SERAFINI
S.SERAFINI@MEDSAMSTERDAM.EU

MEDS BV - HENGEL (NL)

FABIAN BRONDI RUEDA
FABIANBRONDI@HOTMAIL.COM

IGN - INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL, LIMA (PE)

WARREN CHURCH
CHURCH_WARREN@COLUMBUSSTATE.EDU
COLUMBUS STATE UNIVERSITY, COLUMBUS (GE-USA)

GABRIELE GARNERO
GABRIELE.GARNERO@UNITO.IT
DIST - POLITECNICO E UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO (ITA)