



UNIVERSIDAD DE GRANADA

Programa de Doctorado en Historia y Artes

Línea: Arqueología y Cultura Material

DE LO MACRO A LO MICRO EN EL DISEÑO ARQUEOLÓGICO.

NUEVAS METODOLOGÍAS PARA LA INVESTIGACIÓN Y LA DIFUSIÓN Y
CASOS DE ESTUDIO.

TESIS DOCTORAL

Presentada por

Paolo Marcialis

DIRECTORES

Prof.ssa Liliana Spanedda

Prof. Riccardo Cicilloni

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Paolo Marcialis
ISBN: 978-84-1195-630-7
URI: <https://hdl.handle.net/10481/98087>

Ringraziamenti	4
Riassunto	5
Resumen	5
1. Introduzione	7
1.1. Presentazione	7
1.2. Opportunità e problematiche	10
2. Obiettivi.....	14
2.1. Obiettivi di carattere generale	14
2.2. Obiettivi specifici	15
3. Metodologia della ricerca.....	19
3.1. Strumenti e software utilizzati.....	19
3.1.1. Strumenti e software topografici	22
3.1.2. Laser scanner 3D	31
3.1.3. ZScan e ZScan Micro (<i>hardware e software</i>).....	41
3.1.4. <i>Structure from motion (SfM)</i>	47
3.1.5. GIS e WebGIS	54
4. Storia degli studi	59
4.1. Gli sviluppi del rilievo archeologico negli ultimi trent'anni	59
4.2. La fotografia aerea a bassa quota	64
4.3. Il rilievo archeologico tridimensionale	73
5. Inquadramento cronologico e culturale dei contesti analizzati.....	84
5.1. L'Eneolitico in Sardegna	84
5.1.1. La Facies Sub-Ozieri o Ozieri II	87
5.1.2. La Facies Filigosa.....	89
5.1.3. La Facies Abealzu	92
5.1.4. La Cultura di Monte Claro	94
5.1.5. La Cultura del Vaso Campaniforme.....	98
5.1.6. Il contesto di Corti Beccia a Sanluri	100
5.1.7. I recinti e circoli megalitici della Sardegna	102
5.2. Le età del Bronzo Recente, del Bronzo Finale e del Ferro in Sardegna. Inquadramento culturale e cronologico.	104
5.2.1. Inquadramento generale	104

5.2.2.	I nuraghi e gli insediamenti	109
5.2.3.	Le sepolture	113
5.2.4.	I luoghi di culto nelle età del Bronzo e del Ferro: edifici templari e pozzi sacri.	114
5.2.5.	La statuaria bronzea nuragica	121
5.2.6.	Il tempio a megaron di Domu de Orgia (Esterzili) e il pozzo di Santu Antinu (Genoni). Inquadramento culturale e cronologico.	123
5.3.	Il passaggio dall'età imperiale al medioevo in Sardegna.....	128
5.3.1.	Il passaggio dall'età imperiale al medioevo in Ogliastra.....	130
5.3.2.	Il contesto di Fusti'e Carca a Tertenia.	132
6.	Il rilievo dei reperti archeologici	142
6.1.	Caso di studio: il rilievo dei vasi miniaturistici rinvenuti in una sepoltura eneolitica in località Corti Beccia (Sanluri).	144
6.2.	Caso di studio: il rilievo di 14 statuine in bronzo rinvenute nei siti di Santu Antinu (Genoni) e Domu de Orgia (Esterzili)	162
7.	Il rilievo dei siti archeologici	200
7.1.	Caso di studio: il rilievo 3D finalizzato allo smontaggio e rimontaggio di una sepoltura eneolitica	200
7.2.	Caso di studio: il rilievo 3D finalizzato alla progettazione del restauro di un tempio nuragico.	213
7.3.	Caso di studio: l'utilizzo di 3D scanner, ZScan, SfM terrestre e da drone, camere 360 per la documentazione dell'indagine archeologica e del restauro di un insediamento di età Tardoantica	231
7.4.	Caso di studio: l'utilizzo di 3D scanner, ZScan, SfM per la documentazione di otto domus de janus decorate.....	249
8.	L'indagine nelle macroaree	285
8.1.	Caso di studio: l'utilizzo di WebGIS, telerilevamento, fotografia e rilievo tridimensionale applicato alla ricerca di recinti e circoli megalitici.....	285
9.	Analisi dei dati, confronti, risultati.....	334
9.1.	Il rilievo dei vasi miniaturistici rinvenuti in una sepoltura eneolitica in località Corti Beccia (Sanluri).	335
9.1.1.	Casi di studio a confronto.	340
9.2.	Il rilievo di 14 statuine in bronzo rinvenute nei siti di Santu Antinu (Genoni) e Domu de Orgia (Esterzili)	352
9.2.1.	Casi di studio a confronto.	357

9.3. Il rilievo 3D finalizzato allo smontaggio e rimontaggio di una sepoltura eneolitica	362
9.4. Il rilievo 3D finalizzato alla progettazione del restauro di un tempio nuragico.....	371
9.5. L'utilizzo di 3D scanner, ZScan, SfM terrestre e da drone, camere 360 per la documentazione dell'indagine archeologica e del restauro di un insediamento di età Tardoantica	379
9.6. L'utilizzo di 3D scanner, ZScan, SfM per la documentazione di otto domus de janus decorate	390
9.7. L'utilizzo di WebGIS, telerilevamento, fotografia e rilievo tridimensionale applicato alla ricerca di recinti e circoli megalitici	393
10. Conclusioni	408
INDICE DELLE FIGURE.....	419
INDICE DELLE TABELLE	424
BIBLIOGRAFIA	425

Ringraziamenti

Un ringraziamento va a tutte le persone che mi sono state vicine nel corso di questa lunga e bellissima esperienza, in primo luogo mia moglie Alice, che ha condiviso con me tutto il mio percorso di studi e lavorativo, e il piccolo Diego, i cui primi mesi di vita sono coincisi con gli ultimi della mia ricerca di dottorato. Credo che proprio il suo arrivo sia stato fondamentale nel darmi la spinta decisiva di cui avevo bisogno per completare l'opera iniziata. Non posso che ringraziare anche tutta la mia famiglia, gli amici e colleghi che in un modo o nell'altro mi hanno dato una mano.

Un sincero ringraziamento al tutor e ai direttori di tesi, che con pazienza e professionalità mi hanno guidato nella stesura di questo lavoro: Prof. Juan Antonio Camara Serrano, Prof.ssa Liliana Spanedda, che ho avuto il piacere e la fortuna di conoscere nel 2017 nell'ambito dei lavori di ricerca presso il sito di Santa Vittoria di Serri, Prof. Riccardo Cicilloni, che conosco oramai da oltre vent'anni e che è stato una guida importante e sempre presente fin dai primi giorni sui banchi dell'Università.

Per i consigli, l'appoggio e la disponibilità nel mettere a disposizione la propria esperienza intendo ringraziare l'amico e collega Federico Porcedda e la mia cugina e collega Ilaria Maria Francesca Pitzalis.

Riassunto

La tesi di ricerca che si presenta affronta una serie di casi di studio in cui diverse tecniche di rilievo vengono sperimentate nella documentazione archeologica. Il disegno dei reperti archeologici, le attività di scavo, di restauro, di valorizzazione dei Beni Culturali, la ricognizione archeologica vengono affrontati con l'utilizzo di 3D laser scanner, *Structure from Motion*, Zscan, fotogrammetria sferica, droni, WebGIS. I vari strumenti vengono confrontati tra loro, nel tentativo di individuare i limiti e le potenzialità degli stessi nell'affrontare i vari casi di studio. La tesi si sviluppa in dieci capitoli: all'introduzione e alla descrizione degli obiettivi segue una parte di metodologia dell'indagine, in cui si descrivono strumenti, software e tecniche. Seguono una breve storia degli studi e un inquadramento cronologico e culturale dei siti archeologici oggetto dell'indagine. La sperimentazione si suddivide in tre capitoli: rilievo dei reperti archeologici, rilievo dei siti archeologici, ricognizione. Gli ultimi due capitoli sono dedicati all'analisi dei dati, ai confronti e alle conclusioni. Queste evidenziano come la scelta della tecnica di rilievo da utilizzare sia da valutare per ogni singolo caso, in quanto nella documentazione dei reperti, dei siti e delle aree vaste si devono soddisfare necessità differenti, talvolta, integrando diversi strumenti. I 3D scanner sono ancora gli strumenti più affidabili e precisi nel rilievo delle misure, mentre le tecniche di fotogrammetria digitale permettono di raggiungere altissimi livelli di qualità dell'immagine.

Parole chiave: rilievo archeologico, digitalizzazione 3D, fotogrammetria digitale, 3D laser scanner, telerilevamento.

Resumen

La tesis de investigación que aquí se presenta aborda una serie de casos de estudio en los que se ensayan diferentes técnicas digitales para la documentación gráfica

arqueológica. Se abordan el diseño de artefactos arqueológicos, las actividades de excavación, la restauración, la puesta en valor del Patrimonio Cultural y la prospección arqueológica utilizando escáner láser 3D, Structure from Motion, Zscan, fotogrametría esférica, drones y WebSIG. Las diferentes herramientas se comparan entre sí en un intento de identificar sus limitaciones y su potencial para abordar diferentes casos de estudio. La tesis se desarrolla en diez capítulos: tras la introducción y la descripción de los objetivos, sigue una sección sobre metodología de la investigación donde se describen herramientas, software y técnicas. A continuación, se presenta una breve historia de los estudios y los antecedentes cronológicos y culturales de los yacimientos arqueológicos objeto de estudio. La experimentación se divide en tres capítulos: estudio, documentación gráfica de hallazgos y yacimientos arqueológicos y prospección arqueológica. Los dos últimos capítulos están dedicados al análisis de los datos, las comparaciones y las conclusiones. Esto pone en evidencia cómo la elección de la técnica de documentación gráfica a utilizar debe valorarse en cada caso concreto, ya que en la documentación del Patrimonio Cultural deben satisfacerse necesidades diferentes, a veces mediante la integración de distintas herramientas. Los escáneres 3D siguen siendo las herramientas más fiables y precisas para las mediciones topográficas, mientras que las técnicas de fotogrametría digital permiten alcanzar niveles muy altos de calidad de imagen.

Palabras clave: documentación arqueológica, digitalización 3D, fotogrametría digital, escáner láser 3D, teledetección.

1. Introduzione

1.1. Presentazione

Questa tesi di ricerca è il risultato di un lungo lavoro, iniziato dallo scrivente nel 2006, il quale, appena concluso il corso di studi della Laurea triennale in Beni Culturali con indirizzo archeologico e iniziato il nuovo corso di Laurea Specialistica¹ in Archeologia presso l'Università degli Studi di Cagliari, si apprestava ad avviare un'attività all'epoca decisamente innovativa, che aveva come cardine la documentazione grafica dei Beni Culturali con l'utilizzo delle nuove tecnologie a disposizione. L'impresa avviata all'epoca, Archeogeo, è stata una delle prime in Italia, e la prima in assoluto in Sardegna, a specializzarsi in questo genere di attività e, nonostante le grandi difficoltà affrontate negli ormai 17 anni di esperienza per poter competere sul mercato anche con aziende con più capitali e mezzi, è ancora in essere. Il movente ha, per queste ragioni, carattere scientifico e personale. L'ammissione al Dottorato di Ricerca presso l'Università di Granada, avvenuta nel 2017 dopo aver avuto la fortuna di incontrare il professore Juan Antonio Camara Serrano e la professoressa Liliana Spanedda, rispettivamente Tutor e Direttrice delle attività di ricerca del Dottorato, con l'appoggio e la co-direzione del professore Riccardo Cicilloni, già relatore della Tesi di Laurea Specialistica in Archeologia, è quindi giunta a seguito di una decennale esperienza lavorativa nel settore del rilievo di reperti mobili e immobili con tecnologie GPS, Total Station, 3D Laser Scanner di varie tipologie, fotogrammetria aerea e terrestre. Il Dottorato ha rappresentato per lo scrivente una grande opportunità per poter riassumere e approfondire gli studi svolti sul campo in un momento in cui queste nuove tecnologie sono entrate prepotentemente nel mondo dell'archeologia. Il titolo stesso della Tesi "*De lo*

¹ Tesi dal titolo "Principi di telerilevamento, GIS e 3D laser scanner applicati alla ricognizione archeologica nell'altopiano di Tacuara - Nurri ed in alcune aree campione della Sardegna, finalizzati all'individuazione di circoli megalitici preistorici". Relatori: prof. Riccardo Cicilloni; prof.ssa Giuseppa Tanda.

macro a lo micro en el diseño arqueológico. Nuevas metodologías para la investigación y la difusión y casos de estudio”, è esplicito sul suo carattere profondamente metodologico e tecnico, che nei casi di studio presi in esame offre, comunque, spunti di ricerca prettamente umanistici. Partendo dall'utilizzo delle tecniche di rilievo per il disegno di reperti ceramici e metallici si arriva fino al loro utilizzo per finalità legate allo scavo e al restauro delle emergenze archeologiche, evidenziando vantaggi e criticità delle tecnologie prese in esame. Tra le finalità del lavoro rientra un'analisi critica dei risultati, ottenuta attraverso l'esperienza diretta nell'uso delle diverse tecnologie utilizzate per il rilievo e il disegno archeologico, in tutti i campi della documentazione e del successivo studio del bene archeologico, sia esso un reperto o un bene immobile. Si vuole dimostrare l'utilità dell'impiego delle tecniche di documentazione digitale come base di partenza per lo studio tecnico-costruttivo e archeologico, al fine di promuovere la conoscenza e favorire la conservazione del bene. Il lavoro offre diversi spunti, derivati dai risultati ottenuti attraverso i casi di studio analizzati: il disegno del materiale ceramico permette di comprendere l'importanza del rilievo tridimensionale per la divulgazione, lo studio, il confronto del dato scientifico; il disegno dei bronzi dimostra quanto, unito alle tecniche di prototipazione, possa essere importante per l'accessibilità; i casi di studio sul campo aiutano a comprendere quanto sia determinante nella tutela e conservazione del bene stesso e nell'economia del cantiere. La rete e le numerose riviste di divulgazione scientifica sono ricche di lavori che trattano dell'argomento e presentano casi di studio, ma lo sviluppo continuo delle tecnologie messe a disposizione della ricerca rende necessario un aggiornamento continuo dei lavori.

Il lavoro è stato suddiviso in dieci capitoli. Nel primo capitolo, di carattere introduttivo, oltre ad una breve descrizione dei capitoli seguenti, si delineano le opportunità e le problematiche legate a questa ricerca e ai risultati attesi e ottenibili. Nel secondo si espongono gli obiettivi, sia di carattere generale che specifici. Il capitolo terzo descrive la metodologia della ricerca, in particolare le modalità di rilievo, gli strumenti e i software sperimentati: strumenti topografici (stazione totale, GPS differenziale, PC palmari, software GeoPro Mercurio,

GeoPro Meridiana, XPad Fusion); i 3D laser scanner terrestri (a tempo di volo o TOF, *time of flight*, a differenza di fase) e i relativi software di gestione, come Trimble RealWorks Survey e Faro Scene (per la registrazione e il filtraggio dei dati), Autodesk ReCap, AutoCAD e CloudCompare (per il trattamento finale); 3D scanner a luce strutturata; i sistemi di scansione ZScan e ZScan Micro, che comprendono hardware e software; i sistemi di fotogrammetria digitale, ovvero droni, camere metriche, sferiche e il software Agisoft Metashape. Nel quarto capitolo si presenta una breve storia degli studi, degli argomenti e delle metodologie trattate: lo sviluppo e la diffusione delle tecniche di rilievo tridimensionale negli ultimi trent'anni, la storia della fotografia aerea a bassa quota (dai palloni aerostatici e aquiloni fino agli aeromobili ad ala fissa e ai droni multirotores a basso costo) e delle varie applicazioni software sviluppate; 3D laser scanner terrestri, 3D scanner a triangolazione, fotogrammetria digitale. Il capitolo quinto è dedicato all'inquadramento storico e culturale dei reperti e dei siti archeologici presentati come casi di studio: una breve descrizione dell'Eneolitico in Sardegna, periodo di riferimento dei casi di studio che riguardano la sepoltura in località Corti Beccia di Sanluri, i vasi miniaturistici trovati al suo interno e i circoli di pietre; le età del Bronzo Recente, del Bronzo Finale e del Primo Ferro in Sardegna, a cui vanno attribuiti i bronzi figurati rinvenuti nei siti di Domu de Orgia di Esterzili e Santu Antinu di Genoni; il passaggio dall'età imperiale al medioevo in Sardegna per il sito di Fusti'e Carca a Tertenia. Nel capitolo sesto si affrontano due casi di studio riguardanti i reperti mobili: il disegno tecnico di una serie di vasi miniaturistici ritrovati all'interno di una sepoltura eneolitica a Sanluri, in località Corti Beccia, con due modalità differenti, la fotogrammetria digitale e lo ZScan Micro, la cui finalità è legata allo studio, al confronto dei materiali e alla divulgazione scientifica dei risultati; il rilievo di 14 statue in bronzo provenienti dal pozzo nuragico di Santu Antinu in Genoni e dal tempio a *megaron* di Domu de Orgia in Esterzili, eseguito con ZScan Micro, fotogrammetria digitale e 3D scanner a luce strutturata. Quest'ultimo caso di studio è finalizzato alla prototipazione dei manufatti, per consentirne una adeguata valorizzazione e per dare vita ad un percorso tattile che ne consenta l'accessibilità anche a soggetti disabili, in particolare ipovedenti

e non vedenti. Nel capitolo settimo le fasi di rilievo fotogrammetrico digitale e scansione 3D vengono descritte nelle operazioni di cantiere. In un caso si analizzano le necessità da soddisfare nella documentazione di un'operazione molto delicata, che prevedeva lo smontaggio, il trasporto e il rimontaggio della sepoltura eneolitica realizzata in lastre di arenaria, già menzionata nel precedente caso di studio dei vasi miniaturistici; nel secondo caso i rilievi finalizzati alla progettazione e alla verifica dei lavori di restauro nel tempio a *megaron* di Domu de Orgia di Esterzili; nel terzo caso rilievi fotogrammetrici, *structure from motion* (aerei e terrestri, anche con camere 360°) e ZScan vengono sperimentati nel corso nel cantiere sito in località di Fusti 'e Carca, nel territorio di Tertenia, nella Sardegna orientale, durato circa un anno e in cui si sono integrati scavi e restauri di un insediamento di epoca classica e tardo antica. Nel quarto caso 3D scanner, fotogrammetria digitale e ZScan vengono utilizzati per rilevare le domus de janas decorate. Nell'ottavo capitolo si applicano le tecnologie alla *survey* archeologica. Il capitolo nono è dedicato all'analisi dei dati, al loro confronto con altri casi di studio, all'esposizione dei risultati ottenuti, sintetizzati nel capitolo conclusivo.

1.2. Opportunità e problematiche

La specificità della materia ha portato, soprattutto nell'ultimo ventennio, alla formazione di quella che si può definire una nuova figura professionale, l'archeologo rilevatore. I compiti che un tempo erano affidati a disegnatori o tecnici ora sono svolti da una figura che conosce le attività di ricognizione sul campo, lo scavo stratigrafico, i materiali archeologici, che sa quale sia la documentazione da produrre per documentarne al meglio le fasi della ricerca. Il confronto sul campo e in post-elaborazione tra due archeologi è sicuramente più semplice e intuitivo che tra un archeologo e un tecnico. Ne consegue che vi siano stati importanti risvolti sul campo professionale e occupazionale. I corsi e i laboratori di rilievo e disegno archeologico, che comprendono anche lo studio e l'utilizzo degli strumenti e delle tecniche di cui si parlava in precedenza, sono

inseriti nei vari livelli di formazione dell'archeologo, dalle lauree triennali fino alle scuole di specializzazione. Esistono, inoltre, corsi e master universitari di varia durata, aperti anche ai non archeologi, che hanno l'obiettivo di formare queste figure altamente specializzate. Sarebbe ormai il momento di valutare la possibilità di organizzare veri e propri corsi di specializzazione di secondo o terzo livello per la formazione della figura dell'archeologo rilevatore.

L'archeologo che intende specializzarsi nella materia del rilievo e farne una professione deve essere naturalmente portato all'utilizzo degli strumenti di misura e prepararsi a dover inseguire le continue innovazioni a cui questo mondo è soggetto. Infatti, macchine e soprattutto software CAD e topografici sono in continua evoluzione e il professionista che intende stare al passo coi tempi e sul mercato deve aggiornarsi continuamente. Questo comporta una serie di costi che devono essere attentamente valutati e relazionati a quella che è la retribuzione degli archeologi che lavorano da liberi professionisti. Se è vero che il costo della strumentazione necessaria ad intraprendere la professione (stazioni totali, GPS, laser scanner, droni, camere metriche, etc.) è sensibilmente diminuito rispetto al passato, è altrettanto vero che stare al passo con l'innovazione comporta costi elevati e non sempre sostenibili.

Resumen Capítulo 1: Introducción

La tesis de investigación es el resultado de un largo trabajo iniciado en 2006 por el autor, que ha culminado, después de un Grado de tres años en Patrimonio Cultural y un Grado de especialización en Arqueología, en el establecimiento de una empresa especializada en la documentación de Bienes Culturales mediante el uso de nuevas tecnologías. El doctorado en la Universidad de Granada, iniciado en 2017, me ofreció la oportunidad de profundizar en los estudios y la experiencia laboral en el levantamiento de artefactos arqueológicos muebles e inmuebles utilizando tecnologías como GPS, estaciones totales, escáner láser 3D y fotogrametría. El título de la tesis, "De lo macro a lo micro en el diseño arqueológico. Nuevas metodologías para la investigación y la difusión y casos de estudio", subraya el enfoque metodológico y técnico del trabajo, con implicaciones humanísticas en los casos de estudio. La investigación se divide en diez capítulos. El primero es introductorio, el segundo expone los objetivos generales y específicos y el tercero se dedica a la metodología empleada en la investigación, presentando las técnicas, la instrumentación y los softwares utilizados para la investigación. El cuarto ofrece una breve historia de los estudios sobre el uso de las nuevas tecnologías en arqueología en las últimas tres décadas y el quinto ofrece un marco cronológico y cultural de los contextos investigados, que abarcan desde el Calcolítico sardo hasta la época tardoantigua. En el sexto se describen dos casos de estudio sobre la representación gráfica de artefactos muebles: una serie de vasijas cerámicas miniaturísticas procedentes de una sepultura calcolítica (Corti Beccia en Sanluri) y catorce estatuillas de bronce procedentes de contextos sagrados de la época nurágica (el templo a megaron de Domu de Orgia en Esterzili y el pozo de Santu Antinu en Genoni). El séptimo capítulo aborda la comparación de técnicas de levantamiento y documentación gráfica digital en distintos yacimientos arqueológicos. En el caso de la sepultura de Corti Beccia se ha debido registrar con precisión el proceso de desmantelamiento y posterior reconstrucción de la estructura. Por otro lado se ha documentado el diseño del templo de Domu de Orgia y se ha verificado la calidad de la restauración preventiva. Finalmente se han llevado a cabo todas las actividades de documentación digital durante las fases de excavación y restauración de los muros de un asentamiento de época tardoantigua,

Fusti'e Carca en Tertenia. El octavo capítulo trata otro caso de estudio, que supone una actualización de la tesis de maestría del autor, en la que se abordaba la búsqueda de círculos y recintos megalíticos a partir de imágenes satelitales. En el noveno capítulo se describen las actividades de análisis de datos, comparando los resultados obtenidos con las diferentes técnicas y con otros casos de estudio. El décimo capítulo presenta las conclusiones del trabajo.

Se destaca la importancia de la formación del arqueólogo especializado en las nuevas técnicas digitales, cuya demanda en las excavaciones arqueológicas ha crecido significativamente en los últimos veinte años. Este profesional es responsable del uso de nuevas herramientas digitales para las actividades de campo y de la producción de documentación digital precisa durante las fases de investigación arqueológica. Este rol ha reemplazado en parte a la de los dibujantes o técnicos, ya que esta figura posee un conocimiento más profundo de los procesos arqueológicos y de los materiales involucrados. La comparación y colaboración entre arqueólogos ahora se facilita más gracias a la presencia de figuras especializadas como esta. Esto ha llevado a cambios significativos en el panorama profesional y laboral del sector. Se destaca la necesidad de una formación específica para esta figura, que incluya cursos dedicados a estas nuevas tecnologías, así como el uso de herramientas y técnicas especializadas. Se propone la necesidad de establecer cursos de especialización de segundo o tercer nivel para la formación de arqueólogos, que deben estar actualizados sobre las últimas innovaciones tecnológicas en el campo de los instrumentos de medición y software CAD, SIG y topográficos. Sin embargo, la actualización constante conlleva unos costes que hay que considerar en relación con la remuneración de los arqueólogos que trabajan como autónomos. A pesar de que el coste de las herramientas ha disminuido, el de mantenerse al día de las innovaciones tecnológicas sigue siendo elevado, lo que puede suponer un reto para los profesionales del sector.

2. Obiettivi

2.1. Obiettivi di carattere generale

Nell'ultimo quarto di secolo, ovvero a partire dalla diffusione su larga scala delle tecniche di rilievo tridimensionale, sono stati pubblicati numerosi lavori sull'argomento. Lo sviluppo di nuove tecnologie e attrezzature rende però necessaria una sperimentazione continua su casi di studio differenti tra loro, per far sì che l'utilizzatore (sia esso un ricercatore o un operatore del settore) abbia a disposizione quanti più riferimenti possibili nella scelta della strumentazione e della metodologia più adatta ad ogni rilievo da eseguire.

Obiettivo di questo lavoro, di carattere prettamente metodologico, è quindi quello di delineare, alla luce delle conoscenze attuali, dell'esperienza maturata nell'ultimo ventennio e delle tecnologie a nostra disposizione quali sono le tecniche, gli strumenti e i software al momento più adatti all'esecuzione del rilievo e del disegno archeologico, attività fondamentale e imprescindibile in tutte le fasi della ricerca e del lavoro di un archeologo. Che si tratti del disegno di un piccolo manufatto, di un intero sito archeologico o di una porzione di territorio, l'archeologo rilevatore deve essere in grado di scegliere la tecnica più adatta al singolo caso. Le finalità del rilievo possono essere differenti: lo studio dei reperti e dei contesti finalizzato alla divulgazione scientifica; la progettazione, il restauro e la conservazione; lo studio e la tutela del territorio. Questa attività è fondamentale per il ricercatore come per il professionista, per gli enti preposti a ricerca e tutela come per le aziende che realizzano grandi opere.

Il lavoro non ha la pretesa di diventare un manuale del rilievo archeologico, ma di individuare per categorie specifiche di manufatti gli strumenti e i metodi di rilievo più adatti a casi di studio molto specifici, che nella manualistica non sempre vengono affrontati in maniera dettagliata.

2.2. Obiettivi specifici

In quello che viene definito micro-rilievo si analizzano due aspetti di questa attività: il primo è di carattere prettamente scientifico, con il rilievo dei manufatti che viene eseguito con tecniche e modalità finalizzate allo studio di una serie di reperti ceramici di tipo miniaturistico, rinvenuti all'interno di una sepoltura risalente all'Eneolitico. Questi reperti, rilevati con tecniche fotogrammetriche, vengono poi restituiti su CAD in un disegno bidimensionale, molto vicino al più tradizionale disegno manuale, con l'elaborazione di sezioni e prospetti del manufatto. Si tratta di un esperimento che ci aiuta a comprendere in quali casi queste tecniche possono essere utilizzate in sostituzione del disegno manuale, i costi, la strumentazione e i software necessari, i reali vantaggi e svantaggi. Dopo aver confrontato due differenti tecniche di rilievo (*ZScan Micro* e *Structure from motion*) si passa all'analisi dei dati per comprendere quali siano i punti di forza e di debolezza delle due tecnologie introdotte.

Nel secondo caso si assiste invece al rilievo di quattordici statue in bronzo provenienti dal tempio a megaron di Domu de Orgia in Esterzili e dal pozzo di Santu Antinu in Genoni con tre differenti tecnologie: 3D laser scanner a luce strutturata, *ZScan Micro* e *Structure from motion*. L'operazione si è resa necessaria perché i comuni in cui le statue sono state rinvenute, nell'ambito della valorizzazione delle aree archeologiche, necessitavano di copie fedeli delle stesse. Non essendo possibile un calco in gomma siliconica per non entrare in contatto con il bronzo ed evitare possibili danneggiamenti, l'unica soluzione per ottenere delle copie fedeli era quella di utilizzare una tecnica di rilievo indiretta ma molto precisa, che permettesse poi di ottenere delle stampe tridimensionali (prototipi) dei reperti rilevati. Questo caso di studio ha permesso di comprendere che le tecniche di rilievo indiretto sono diventate ormai fondamentali sia per la tutela che per la valorizzazione dei contesti archeologici. Il confronto delle tre tecnologie utilizzate ha permesso di comprendere, sulla base dei risultati ottenuti e del rapporto costi/benefici, quale tecnica sia più adatta a questo scopo e quali siano i margini di miglioramento.

Nel capitolo dedicato al rilievo dei siti archeologici si presentano, invece, altri tre casi di studio, in cui il primo ha finalità legate alla tutela e alla valorizzazione, il secondo e il terzo a attività di indagine e restauro. Nel sito di Corti Beccia, in agro di Sanluri, una sepoltura dell'Eneolitico necessitava di essere smontata, trasportata e rimontata per consentirne la conservazione e la valorizzazione a seguito delle attività di indagine stratigrafica. Tale operazione sarebbe stata molto più lunga, complessa e imprecisa con l'utilizzo di tecniche tradizionali. Anche in questo caso si è dimostrato come ogni tecnologia adoperata offra risultati differenti, sia nella precisione delle misurazioni che nella qualità degli elaborati finali.

Nel tempio a megaron di Domu de Orgia di Esterzili 3D laser scanner e fotogrammetria digitale vengono applicate a rilievi finalizzati alla progettazione di un restauro e alla verifica del risultato, mostrando come queste due tecniche di rilievo possano essere integrate con successo.

Nel sito archeologico di Fusti'e Carca (Tertenia), emerso nel corso dei lavori di realizzazione della nuova Strada Statale 125 Orientale Sarda, è stato possibile testare varie tecniche di documentazione nell'ambito dei lavori di indagine e restauro delle murature di un insediamento di età Tardoantica. In questo caso sono state messe in campo quasi tutte le tecniche di rilievo applicate dallo scrivente nel corso della sua esperienza, da quelle più diffuse, come 3D laser scanner terrestre e SfM, a quelle meno conosciute come la fotogrammetria da camere 360. I risultati ottenuti hanno permesso di comprendere che in cantieri complessi e di lunga durata è opportuno che si utilizzino più tecniche di documentazione, di cui l'archeologo disegnatore deve avere piena padronanza. Nel lavoro di ricognizione delle macroaree finalizzato all'individuazione di circoli di pietre le tecniche di rilievo e i dati disponibili nei WebGIS hanno dimostrato come un'attività di *survey* archeologica possa essere supportata da questi strumenti e software.

Resumen Capítulo 2: Objetivos

La investigación es de naturaleza metodológica, con el objetivo de identificar las técnicas, herramientas y software más adecuados para el levantamiento y diseño arqueológico, considerando los conocimientos actuales, la experiencia acumulada y las tecnologías disponibles. Esta investigación tiene como objetivo proporcionar un marco detallado para ayudar a los investigadores y operadores del sector a seleccionar la instrumentación más adecuada para cada tipo de levantamiento arqueológico. Los objetivos específicos abordados son el uso de herramientas para el estudio y la documentación digital de objetos y yacimientos arqueológicos a nivel micro y macro, también con la ayudas de imágenes satelitales (prospección remota). En el caso del micro-levantamiento, se analizan dos actividades. La primera implica el levantamiento de artefactos cerámicos encontrados en una sepultura calcolítica, utilizando técnicas fotogramétricas para elaborar un dibujo bidimensional en CAD. La comparación entre dos técnicas de levantamiento, ZScan Micro y Structure from Motion (SfM), ayuda a evaluar sus fortalezas y debilidades. El segundo caso se refiere al levantamiento de estatuillas de bronce procedentes de dos yacimientos arqueológicos diferentes, utilizando tres técnicas de levantamiento. Este estudio permite comprender la eficacia de las técnicas de levantamiento indirectas para la protección y valorización de los artefactos. En cuanto al levantamiento de yacimientos arqueológicos, se presentan varios casos de estudio. El primero se refiere al proceso de desmantelamiento y posterior reconstrucción de una sepultura calcolítica para permitir su conservación y valorización. En el segundo caso, estas nuevas técnicas digitales se aplican a un templo a megaron para planificar su restauración. Otro caso se centra en la documentación de todas las actividades de excavación y restauración conservativa de un asentamiento tardoantiguo descubierto durante la construcción de una nueva carretera estatal. En el cuarto caso nos ocupamos de la documentación de las domus de janas. El último caso de estudio aborda los problemas relacionados con la búsqueda de círculos de piedra megalíticos en Cerdeña mediante el uso de todos los datos disponibles en la Web, con una búsqueda ampliada de los yacimientos identificados. Estos casos demuestran la importancia de utilizar una variedad de técnicas de documentación

para abordar de la mejor manera posible la documentación específica de cada yacimiento arqueológico.

3. Metodologia della ricerca

3.1. Strumenti e software utilizzati

L'approccio alla ricerca è stato guidato dall'impiego di strumenti suddivisibili in tre categorie distinte, le cui differenze non risiedono tanto nella tecnologia e nei metodi di misurazione applicati (l'obiettivo del lavoro non è un'analisi dettagliata del funzionamento degli strumenti, in quanto ciò rappresenterebbe una ripetizione di numerosi studi già pubblicati), bensì nei risultati che gli archeologi possono ottenere attraverso il loro utilizzo. Le categorie in questione sono gli strumenti topografici (stazione totale e GPS differenziale), i 3D Laser Scanner (a tempo di volo, a differenza di fase, a luce strutturata), i droni e le fotocamere digitali terrestri. I primi strumenti menzionati, gli strumenti topografici, sono presenze consolidate nel campo dell'archeologia sin dagli anni Ottanta del secolo scorso.



Fig. 1 - Rilievo con strumentazione DGPS.

Questi dispositivi sono noti per la loro capacità di fornire misurazioni estremamente precise, seppur puntuali o lineari (Fig. 1). La loro utilità risiede nella capacità di delineare dettagli specifici di un sito archeologico, contribuendo a creare mappe e rappresentazioni dettagliate partendo dal dato topografico. Tuttavia, è importante sottolineare che le loro capacità potrebbero limitarsi a misure specifiche, spesso senza offrire una visione completa degli oggetti rilevati. La seconda categoria di strumenti, i 3D Laser Scanner, si distingue in diverse categorie, sulla base della tecnica di misurazione: il tempo di volo, la differenza di fase o la luce strutturata, consentendo di ottenere nuvole di punti e superfici 3D direttamente dalle misurazioni. Ciò significa che si possono elaborare rappresentazioni tridimensionali dettagliate degli oggetti archeologici, inclusi dettagli colorati. Questi strumenti offrono una prospettiva più completa rispetto agli strumenti topografici, permettendo agli archeologi di esplorare in dettaglio la forma e la struttura degli oggetti, contribuendo a una comprensione più approfondita del contesto archeologico. Infine, la terza categoria di strumenti, rappresentata da droni e fotocamere digitali terrestri, si posiziona al crocevia della tecnologia moderna e della fotogrammetria digitale. L'impiego di droni, insieme ai sofisticati software di fotogrammetria, offre la possibilità di ottenere nuvole di punti e superfici terrestri derivanti da misure immagini digitali. Ciò è reso possibile grazie alla capacità dei droni di catturare immagini aeree ad alta risoluzione, che vengono successivamente elaborate attraverso algoritmi avanzati di fotogrammetria digitale. Questa metodologia consente l'elaborazione di modelli tridimensionali dettagliati, contribuendo così a fornire una visione completa e dettagliata dell'area di interesse. Va notato che ogni categoria di strumenti ha le sue specifiche applicazioni e vantaggi. Gli strumenti topografici sono ideali per misure puntuali, mentre i 3D Laser Scanner sono particolarmente adatti per ottenere rappresentazioni tridimensionali dettagliate di oggetti specifici. I droni e le fotocamere digitali terrestri si distinguono per la loro capacità di coprire ampie aree e fornire una prospettiva aerea che spesso sfugge ad altri strumenti. Nel complesso, l'integrazione di queste categorie di strumenti offre agli archeologi una serie di metodi diversificati e complementari per condurre ricerche approfondite. La ricerca si

concentra sulla comprensione dei risultati ottenibili attraverso l'utilizzo di tali strumenti, piuttosto che su una disamina dettagliata delle loro specifiche tecniche. Questo approccio consente di concentrarsi sulla ricchezza di informazioni che possono emergere dalla combinazione di tecnologie avanzate e metodologie consolidate nel campo dell'archeologia, contribuendo così a un quadro più ampio e approfondito della ricerca.

3.1.1. Strumenti e software topografici

La topografia è una branca della geodesia, che applica i metodi e gli strumenti di misura per ottenere le rappresentazioni grafiche di una porzione, più o meno estesa, della superficie terrestre. Essa è una materia fondamentale in numerose attività svolte dall'archeologo, dallo scavo alla ricognizione, soprattutto quando si ha la necessità di riferire all'interno di sistemi assoluti o relativi le attività di indagine. Non potrebbe essere altrimenti in tutte le attività legate al rilievo e alla documentazione grafica. Un utilizzo appropriato della strumentazione topografica non può prescindere da una conoscenza di base della materia. Stazioni totali e GPS differenziali rappresentano ancora oggi gli strumenti di misura più diffusi nel mondo dell'archeologia, sia per le operazioni preliminari che per rilievi di dettaglio. La realizzazione di reti geodetiche di inquadramento, il posizionamento di punti d'appoggio, *markers*, da utilizzare come riferimento per rilievi fotogrammetrici o 3D laser scanner, il semplice rilievo di quote sono tutte operazioni che negli ultimi trent'anni sono diventate più semplici e precise grazie all'uso della strumentazione descritta. Ciononostante, è sempre opportuno che l'archeologo, in particolare colui che si occupa delle attività di documentazione, conosca in maniera approfondita anche i metodi di rilievo tradizionali.

Stazione totale e X-PAD Fusion

La Stazione totale rappresenta la naturale fusione tra il teodolite (lo strumento ottico a cannocchiale utilizzato per decenni nella misurazione degli angoli azimutali e zenitali), il più recente distanziometro laser e un software di calcolo in grado di tradurre i dati raccolti sotto forma di distanza-angolo in coordinate xyz (MEDRI 2003). Le misurazioni possono avvenire in maniera diretta, con il raggio laser che viene indirizzato direttamente sul punto di rilevare, o per mezzo di un prisma riflettente. Gli strumenti più recenti, dotati di software di visualizzazione e gestione del rilievo, che può essere integrato o installato su un palmare o uno smartphone, non devono essere necessariamente posizionati su un caposaldo, ma permettono di lavorare a "stazione libera", ovvero

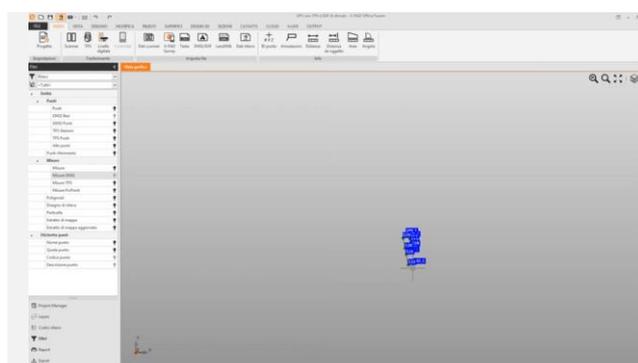
posizionando lo strumento nel punto più congeniale al rilievo da eseguire e sfruttando una rete di punti di riferimento realizzata in precedenza. La stazione totale è forse, ancora oggi, lo strumento di misura più utilizzato nei cantieri, non solo archeologici. La sua introduzione negli scavi è avvenuta già negli anni Ottanta, con una vera e propria diffusione capillare nel corso del decennio successivo, soprattutto in quei cantieri che all'epoca potevano attingere a finanziamenti importanti o che potevano avere tra i componenti del gruppo di lavoro geometri, ingegneri o tecnici in genere muniti di strumentazione, che si utilizzava prevalentemente nella progettazione ex-novo di edifici o per i lavori di tipo catastale. Non dimentichiamo che il costo di una stazione totale negli anni Ottanta era decisamente elevato². Il caso di studio in cui è stata utilizzata la stazione totale è lo smontaggio e rimontaggio della sepoltura eneolitica di Corti Beccia a Sanluri, un lavoro che non necessitava di spostamenti continui del punto di stazione. Il Modello prescelto è una Geomax Zoom 10, strumento di fascia media, di cui si inserisce una tabella riassuntiva con le specifiche tecniche e una descrizione del software di gestione³.

Modello	Geomax Zoom 10
Precisione angolare	2''
Portata senza prisma	350 m
Prisma singolo	3.000 m
Tre prismi	6.000 m
Ingrandimento cannocchiale	30x
Campo visivo	1°20' (2,3 m a 100 m)
Sistema compensatore	Biassiale

² Se oggi con una cifra che si aggira attorno ai 3.000,00 euro si può acquistare uno strumento di misura con tutte le funzioni necessarie a sviluppare il lavoro, all'epoca erano necessari circa 30.000.000 di lire da rivalutare al cambio attuale. Ne consegue che il costo di questa strumentazione era paragonabile a quello che ha oggi un 3D laser scanner di fascia media.

³ www.geomax.it.

Precisione	1”
Interfaccia	RS232 standard, scheda SD, unità USB con micro USB, Bluetooth®
Memoria dati interna	Circa 20.000 punti
Formato dati	ASCII
Piombo	Laser, 4 livelli di luminosità
Display	Retroilluminato Grafica: 280 x 160 pixel Carattere: 6 linee x 25 caratteri
Registrazione dati	1 GB di memoria interna, scheda SD rimovibile e chiavetta USB



Interfaccia XPAD Fusion



Stazione totale Geomax Zoom 10

Tabella 1 Specifiche tecniche stazione totale

La gestione dello strumento può avvenire con due modalità: integrata, ovvero dalla tastiera e dal monitor montato di serie sullo strumento, e remota, con uno smartphone o tablet con sistema operativo Android e il software XPAD Office Fusion installato. La modalità integrata, quella da sempre utilizzata nelle stazioni totali, è utile quando si eseguono rilievi speditivi, con pochi punti e senza la necessità di visualizzare il lavoro in tempo reale. Il settaggio dello strumento non è molto intuitivo, così come sono limitate le possibilità di

collegare il rilievo ad altri lavori. In un cantiere complesso è sicuramente consigliabile gestire lo strumento con un dispositivo esterno e X-PAD Office Fusion o software simili. Queste piattaforme permettono di gestire più strumenti⁴ e di creare un progetto padre con tutti i riferimenti necessari alla gestione e implementazione dei dati di rilievo giornalieri. I rilievi possono essere elaborati sul campo in via preliminare, con la possibilità di implementare dei vettori: queste funzionalità sono molto utili quando si ha la necessità di disegnare polilinee (è il caso di un tratto murario, una scarpata, un saggio lineare, una sezione) o poligoni (i limiti definiti di una unità stratigrafica). Ai punti possono essere associate informazioni di vario genere e immagini (una descrizione, la foto di un reperto ancora in strato, un punto di riferimento, etc.). L'organizzazione per tabelle consente di gestire, ricercare e filtrare i dati in maniera molto intuitiva e rapida. Si possono importare dati georiferiti come ortofoto, vettoriali (.dwg/.dxf), modelli digitali del terreno (DEM) e nuvole di punti. È possibile lavorare con uno sfondo dinamico direttamente su Google Maps.

DGPS, Geopro Mercurio, Geopro Meridiana

Il GPS differenziale (o DGPS)⁵, lanciato sul mercato alla fine degli anni Ottanta, è stato introdotto nel mondo dell'archeologia nel decennio successivo e, rispetto alle stazioni totali e al suo principale software di applicazione, il GIS (CAMPANA-FRANCOVICH 2005), ha avuto e ha ancora oggi una diffusione molto più limitata, dovuta a diversi fattori; tra questi, indubbiamente, il costo dell'attrezzatura e la possibilità di utilizzarlo esclusivamente in campo aperto. Oggi è più corretto parlare di GNSS (*Global Navigation Satellite System*), poiché i ricevitori satellitari presenti sul mercato sono in grado di ricevere il segnale da satelliti russi (GLONASS), cinesi (BEIDOU), indiani (IRNSS) ed

⁴ Le grandi case costruttrici consentono, infatti, di gestire stazioni totali, ricevitori DGPS, livelli laser e perfino nuvole di punti da 3D laser scanner con un unico software, intervenendo su un singolo progetto con più strumenti. La gestione dei dati in *cloud* consente di lavorare contemporaneamente sul campo e in ufficio.

⁵ *Differential Global Positioning Sistem.*

Europei (GALILEO) (GUALANDI 2010). Il cantiere di Fusti'e Carca a Tertenia, uno dei casi di studio affrontati, si prestava bene all'utilizzo di un GPS differenziale per varie ragioni: la vastità dell'area (2.500 metri quadrati di scotico e 1.300 di scavo archeologico) richiedeva uno strumento che permettesse di muoversi in piena libertà, senza il vincolo di stazioni di riferimento e ostacoli visivi tra queste e i punti da rilevare; allo stesso tempo necessitava di una precisione centimetrica e di un apparato che permettesse di rilevare i punti velocemente e senza impedimenti per gli operatori impegnati nelle attività di scavo e restauro. Per queste ragioni la scelta è ricaduta su un sistema costituito da ricevitore mobile (*rover*) e ricevitore fisso (base di riferimento) gestiti da un palmare esterno e da software topografici di elaborazione. L'uso della stazione base portatile abbinata al ricevitore mobile consente di avere un doppio vantaggio: permette, infatti, di essere indipendenti dalle stazioni fisse presenti su tutto il territorio regionale (queste comunicano per mezzo della rete telefonica mobile, non sempre di ottima qualità lontano dai centri abitati) e di rilevare i punti molto più velocemente, poiché a brevi distanze e in assenza di ostacoli i due strumenti scambiano dati in tempo reale attraverso canali radio dedicati. Il modello utilizzato è un Hiper Rover della Topcon, nella configurazione per il rilievo in tempo reale (*Real Time Differential GPS*), gestito da un dispositivo portatile Nautiz X7 e dal software Geopro Mercurio nelle fasi di rilievo e Geopro Meridiana in post-elaborazione⁶.

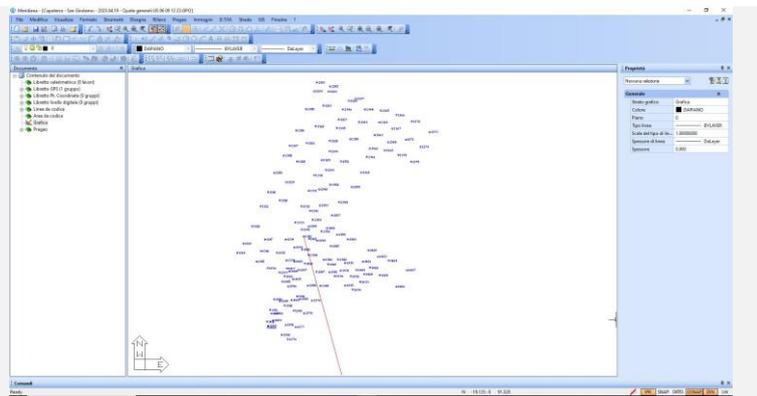
La gestione del ricevitore GPS può avvenire esclusivamente da PC palmare, con installato un software topografico da cantiere, non necessariamente della stessa casa costruttrice. Per i rilievi con Topcon Hiper Pro è stato comunque utilizzato il software fornito dalla casa madre, Geopro Mercurio, che permette una gestione semplice ed intuitiva dei ricevitori. La prima operazione per eseguire un rilievo è di piazzare la stazione base su treppiede, in un punto possibilmente visibile da tutto il cantiere e libero da ostacoli come alberi e edifici.

⁶ <https://www.topconpositioning.com/it/>.

Modello ricevitore	Topcon Hiper Pro
Numero di canali	40 L1 GPS/GLONASS, 20 L1 + 20 L2 GPS/GLONASS
Segnali tracciati	L1/L2 Codici C/A e P, Fase, GPS/GLONASS, WAAS, EGNOS
Precisione	3 mm + 0,5 ppm per L1+L2, 5 mm + 1,5 ppm per L1
Precisione in RTK	10 mm + 1 ppm per L1+L2, 15 mm + 2 ppm per L1
Memoria dati interna	fino a 1 Gb
Campionamento dati	fino a 20 Hz



Topcon Hiper Pro



Interfaccia Geopro Meridiana

Tabella 2 Specifiche tecniche ricevitore DGPS

Modello Palmare	Handheld Nautiz X7
Processore	Marvell PXA310 806 MHz
Memoria	128 MB SDRAM
Memoria dati	4 GB iNAND Flash
Sistema operativo	Microsoft Windows Mobile 6.1
Display	480x640 pixel antiriflesso
Fotocamera	Integrata 3 megapixel
Comunicazione	Bluetooth 2.0, WLAN, UMTS
GPS integrato	SiRF Star III



Tabella 3 Specifiche tecniche Palmare di gestione

Una volta avviato il software Geopro Mercurio il palmare viene collegato via Bluetooth alla stazione base per la registrazione delle coordinate di riferimento WGS84. A questo punto si attiva il ricevitore mobile, che si connette via Bluetooth al palmare e via radio alla stazione base. Dopo aver creato un nuovo progetto si può iniziare con il rilievo. Anche il software Mercurio consente di eseguire operazioni CAD basilari già sul campo (polilinee, poligoni, orientamento) e di associare informazioni e immagini al singolo punto. È possibile importare immagini e carte georiferite in vari formati, implementare dati GIS, esportare i rilievi in formato vettoriale (.dxf, .dwg, .ascii, .shp, etc.). La versione da tavolo del software Mercurio è Geopro Meridiana, che consente di eseguire operazioni CAD più complesse, elaborare e gestire dati GIS dal rilievo, unire progetti, importare ed esportare dati, con tutte le potenzialità che offre un software da tavolo rispetto a una versione mobile.

Stazione totale e DGPS hanno avuto, nei casi di studio presentati nei capitoli successivi, quasi sempre la stessa finalità: inquadramento topografico di un'area archeologica⁷, materializzazione di punti di riferimento⁸, posizionamento di *target* riflettenti o sferici da utilizzare per i rilievi con 3D laser scanner e fotogrammetrici, calcoli rapidi di aree e volumi⁹, rilievo di quote e limiti delle unità stratigrafiche, posizionamento dei reperti più significativi¹⁰. La scelta dell'uno o dell'altro strumento dipende principalmente dallo spazio in cui si sviluppano i saggi di scavo. Quando si tratta di uno scavo al coperto o in una posizione che potrebbe interferire con il buon funzionamento del GPS, in tal maniera da rendere imprecisa o troppo lenta la battuta dei punti, la scelta deve

⁷ La georeferenziazione, ovviamente, è stata eseguita con strumentazione DGPS ma, nel caso si abbiano a disposizione dei punti di riferimento, è possibile utilizzare qualsiasi strumento topografico.

⁸ In tutti i lavori di scavo archeologico presentati è stata realizzata una quadrettatura virtuale, con pochissimi punti di riferimento materializzati sul terreno.

⁹ Negli scavi in estensione è spesso necessario tenere sotto controllo le quantità di lavoro sviluppate; gli strumenti topografici risultano sicuramente più immediati di 3D laser scanner o tecniche fotogrammetriche per eseguire queste operazioni di computo.

¹⁰ Anche in questi ultimi due casi, come vedremo, per la successiva elaborazione delle piante di strato e delle sezioni, il rilievo con strumentazione topografica risulta essere ancora molto utile e sbrigativo.

obbligatoriamente ricadere sulla stazione totale. Quando l'area è invece all'aperto e in buone condizioni di visibilità del ricevitore GPS con i satelliti, ma le dimensioni del saggio sono limitate e visibili da un'unica stazione, l'uso dell'uno o dell'altro strumento non fa grandi differenze e deve essere l'operatore a scegliere quello che gli è più congeniale per il risultato che vuole ottenere. Quando uno o più saggi ricadono su un'area vasta centinaia o migliaia di metri quadrati (come in uno dei casi di studio analizzati), con una morfologia del terreno complessa, con diverse squadre di archeologi e operatori impegnati nello scavo archeologico e nel restauro delle superfici, è sicuramente consigliabile l'uso del GPS, che consente di avere maggiore flessibilità e libertà di movimento. Nei casi in cui la precisione centimetrica non è invece necessaria, come nelle ricognizioni di superficie, lo stesso palmare che si collega al GPS per la gestione del ricevitore può essere utilizzato per il rilievo di punti di interesse mobili o immobili con precisione sub-metrica. Quando è sufficiente una precisione metrica i moderni smartphone sono più che adatti a svolgere questo compito¹¹.

¹¹ Alcuni software che si possono utilizzare per le attività di ricognizione: Google Maps, Geoparazzi, Qfield.

3.1.2. Laser scanner 3D

3D laser scanner a differenza di fase

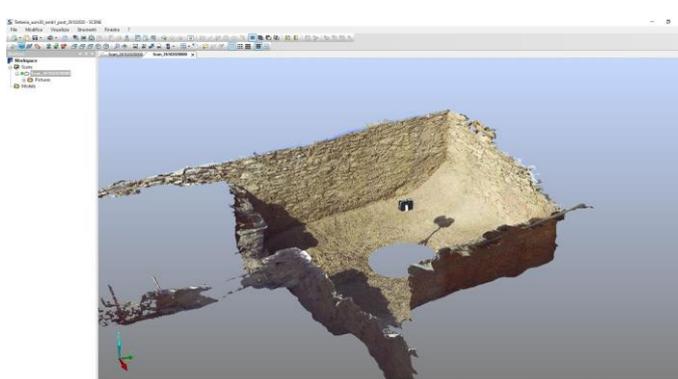
Nel corso dei rilievi eseguiti presso l'area di Fusti'e Carca a Tertenia e presso il tempio a *megaron* di Domu de Orgia di Esterzili è stato utilizzato un 3d scanner Focus S120 prodotto da CAM2 Faro, che dato il peso ridotto (5 kg) e la velocità elevata di scansione (fino a 900.000 punti al secondo) ha notevolmente agevolato i tempi della restituzione grafica. Lo strumento è costituito da un sistema integrato che comprende tre elementi fondamentali: l'emettitore laser, la fotocamera integrata e il software di scansione, gestito da un monitor integrato al corpo macchina. L'emettitore laser, il cui raggio viene indirizzato nelle tre dimensioni da uno specchio rotante, è la componente che fisicamente effettua il rilievo e permette di ottenere la nuvola di punti, un file di testo che contiene le coordinate *xyz* di milioni di punti per ogni stazione rilevata. La fotocamera integrata permette di aggiungere ai campi *xyz* i valori del colore (RGB) per ogni singolo punto rilevato. Il software è necessario per definire l'area da rilevare e visualizzare su un piccolo monitor LCD l'anteprima del rilievo, constatandone nell'immediato la buona riuscita. In genere sono state necessarie tre stazioni di presa per ogni ambiente (due all'interno e almeno una di collegamento all'esterno); la registrazione delle scansioni può essere eseguita manualmente, con il riconoscimento di più punti comuni tra due o più scansioni, o con l'ausilio dei punti di riferimento (*target*) utilizzati anche per GPS e fotogrammetria. Il software di elaborazione, Faro Scene nella versione 5.1, viene utilizzato esclusivamente per l'allineamento delle scansioni e per l'esportazione dei dati.

Tabella 4 Specifiche tecniche 3D laser scanner CAM2 Faro Focus 3DS 120 (pagina seguente)

Modello 3d scanner	CAM2 Laser Scanner Focus 3DS 120
Intervallo di disambiguità	153,49 m
Range	0,6 m – 120 m con riflettività del 90%
Velocità di misura (punti/secondo)	122.000 / 244.000 / 488.000 / 976.000
Errore di distanza lineare	± 2 mm a 25 m
Deviazione standard a 25 m	0,5 mm con 90% di riflettività
Risoluzione camera	70 megapixel a colori
Campo visivo	300°/360°
Risoluzione (vert./orizz.)	0,009 ° (40.960 3D-pixel a 360 °)
Max velocità di scansione	5.820 rpm o 97 Hz
Potenza laser (CW)	20 mW (laser classe 3R)
Lunghezza d'onda	905 nm
Divergenza del raggio	0,19 mrad (0,011 °)
Diametro del raggio (in uscita)	3,0 mm, circolare



CAM2 Faro Focus 3DS 120



Faro Scene

3D laser scanner a tempo di volo (TOF)

Nel caso del rilievo della sepoltura in località Corti Beccia di Sanluri e nelle fasi di progettazione dell'intervento sul tempio di Domu de Orgia di Esterzili è stato utilizzato anche un laser scanner TOF Trimble GS 100, che ha permesso di confrontare due diverse tipologie di strumenti. I TOF sono degli scanner a lungo raggio (esistono in commercio modelli che permettono di misurare punti ad una distanza di 6000 m), e per queste ragioni sono utilizzati soprattutto in campo ambientale. La distanza del centro strumentale dal punto rilevato viene calcolata attraverso la misura del "tempo di volo", ovvero il tempo che intercorre tra l'emissione del raggio e la sua ricezione dopo aver colpito la superficie riflettente. Le coordinate *xyz* sono determinate, inoltre, dalle angolazioni azimutali e zenitali del raggio (BARTOLUCCI 2009). La distanza ottimale per l'utilizzo dei laser scanner TOF è compresa tra i 10 m e i 100 m, al di sotto dei 2 m il rilievo avviene con grosse difficoltà, minore precisione e l'ottenimento di nuvole di punti molto rumorose. Il modello di laser scanner Trimble Menci GS100 è stato utilizzato in passato, dallo scrivente, per il rilievo di domus de janas e grotte. Ha una portata di circa 180 m e la possibilità di rilevare oltre 3000 punti al secondo; l'angolo di scansione orizzontale è di 360°, quello verticale di 60°; possiede una camera CCD interna che associa il colore ai punti rilevati; il peso è di 13 kg e le dimensioni 32 cm x 42 cm x 28 cm; necessita di alimentazione esterna a 220 Volt, disponibile in campagna con l'utilizzo batterie o generatore di corrente; per la gestione dei parametri di scansione e il salvataggio dei dati è necessario il collegamento ad un PC dotato di software Trimble Point Escape, disponibile anche su PC palmare. Le scansioni rilevate, la cui buona riuscita può essere verificata nell'immediato, vengono poi gestite e allineate con il software Trimble RealWorks Survey, sia con il riconoscimento di punti comuni che con l'utilizzo dei *target*. RealWorks Survey permette di gestire scansioni provenienti da altri strumenti, con possibilità di elaborare *mesh*, ortofoto, DEM, calcolare curve di livello¹².

¹² www.trimble.com.

Modello 3d scanner	Trimble (Menci) GS100
Metodo di misura	Tempo di volo
Range	0,6 m – 180 m
Interfaccia	Network TCP/IP
Velocità di misura (punti/secondo)	3.000
Errore di distanza lineare	± 6,5 mm a 100 m
Colore del laser	Verde
Sicurezza	Class 2 (21 CFR §1041.10) / Class 3R (IEC 60825-1)
Risoluzione camera	768 × 576 pixel a colori
Campo visivo	360°/60°



Trimble Menci GS100



Trimble RealWorks Survey

Tabella 5 Scheda tecnica 3D laser scanner Trimble GS100

3D scanner a luce strutturata

Gli strumenti a luce strutturata sono nati per il rilievo di dettaglio di piccoli oggetti o parti meccaniche da verificare e riprodurre in fase di progettazione. Sono composti da un proiettore di luce strutturata che illumina l'oggetto da rilevare con bande di luce verticali o orizzontali, i *pattern*, nel campo dell'infrarosso o della luce bianca, la cui deformazione viene analizzata da una o più camere ad alta risoluzione posizionate su punti noti. Con complessi algoritmi di triangolazione il software di gestione è in grado di ricostruire la forma dell'oggetto in un sistema di coordinate *xyz*, con la restituzione di una nuvola di punti o di una *mesh* texturizzata. La risoluzione del proiettore e lo spessore delle linee determinano il livello di precisione. Si tratta solitamente di strumenti con un'elevata portabilità, molto precisi e facili da utilizzare; non necessitano di riferimenti esterni, poiché calcolano la posizione dei punti sfruttando complessi algoritmi derivati dalla fotogrammetria, con scansioni che avvengono in pochi secondi. Esistono software che con l'ausilio di piatti rotanti sincronizzati sono in grado di allineare automaticamente le singole scansioni. Le aree di scansione variano da pochi centimetri a circa 1 metro quadrato. L'hardware utilizzato varia in base alla casa costruttrice; si possono trovare sul mercato camere fotogrammetriche posizionate su slitte graduate, che permettono di conoscere i punti di presa delle immagini, o camere CCD ad alta risoluzione calibrate con proiettore di luce strutturata (Tabella 6). Tali strumenti hanno, quindi, un apparato hardware abbastanza semplice, poiché il lavoro più importante è svolto dal software di elaborazione. Sono molto precisi ma con aree di scansione limitate e lunghi tempi di elaborazione, adatti soprattutto al rilievo di particolari di strutture o di reperti archeologici.

Modello 3d scanner	Scan System
Metodo di misura	Luce strutturata
Metodo di scansione	Libero, su piatto rotante, markers
Range	0,15 m – 1,20 m
Risoluzione	0,04 mm

Proiettore	1280x800
Texture	Si
Camera	ICCD 768 × 576 pixel a colori
Velocità di scansione	2''
Colore luce	Bianca



3D scanner Scansystem



3D scanner Scansystem in fase di acquisizione

Tabella 6 Specifiche tecniche 3D scanner Scan System

Autodesk ReCap

Autodesk ReCap (Fig. 2) è il software che la celebre *software house* statunitense ha prodotto in varie versioni per la gestione delle nuvole di punti, in particolare quelle provenienti da 3D laser scanner terrestre e LIDAR. ReCap ha delle opzioni di visualizzazione che permettono di gestire nuvole di punti di grandi dimensioni, nei più diffusi formati, e di condividerle con AutoCAD per il disegno vettoriale e la progettazione. I software di gestione per 3D laser scanner come Faro Scene o Trimble Realworks Survey permettono di esportare i progetti direttamente in formato ReCap (.rcp), con una completa condivisione dei dati contenuti nel *file* di scansione, incluse le immagini piane, le viste a 360°, le informazioni sul colore, l'allineamento.

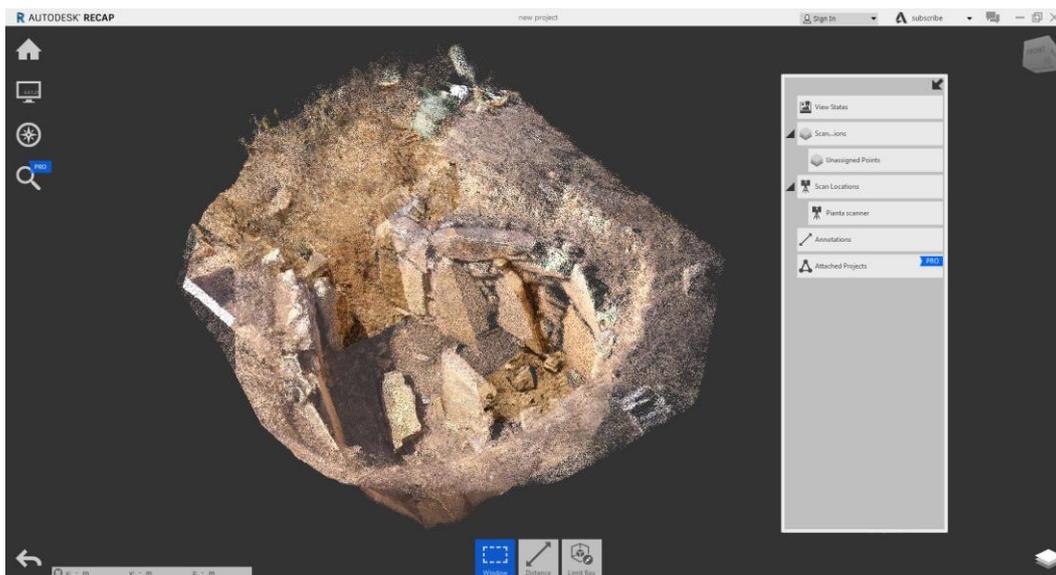


Fig. 2 - Nuvola di punti della sepoltura di Corti Beccia (Sanluri) in Autodesk ReCAP.

Autodesk AutoCAD

Si tratta probabilmente del software di disegno vettoriale per la progettazione più diffuso e utilizzato, e il mondo dell'archeologia non fa eccezione. Da circa un decennio consente una gestione integrata di nuvole di punti anche molto complesse, mentre in passato necessitava dell'utilizzo di applicativi esterni prodotti da altre *software house*; uno dei più utilizzati è stato Kubit PointCloud (LAEFER *ET ALII* 2011). Permette di vettorializzare con estrema rapidità nuvole di punti, ortofoto, mesh, consentendone l'impaginazione per la condivisione e la stampa finale (Fig. 3).

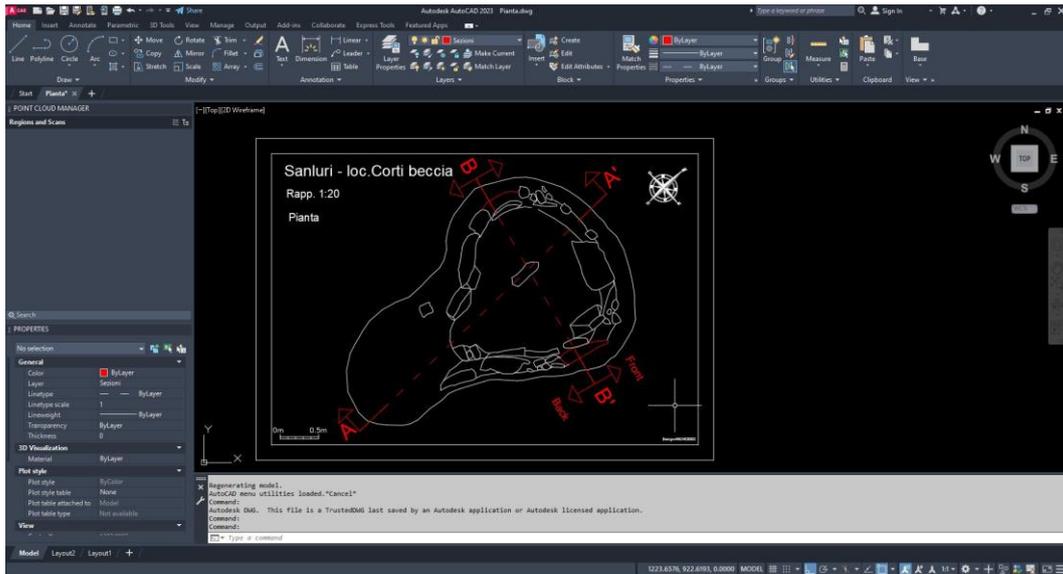


Fig. 3 - Elaborazione di una planimetria in Autodesk AutoCAD.

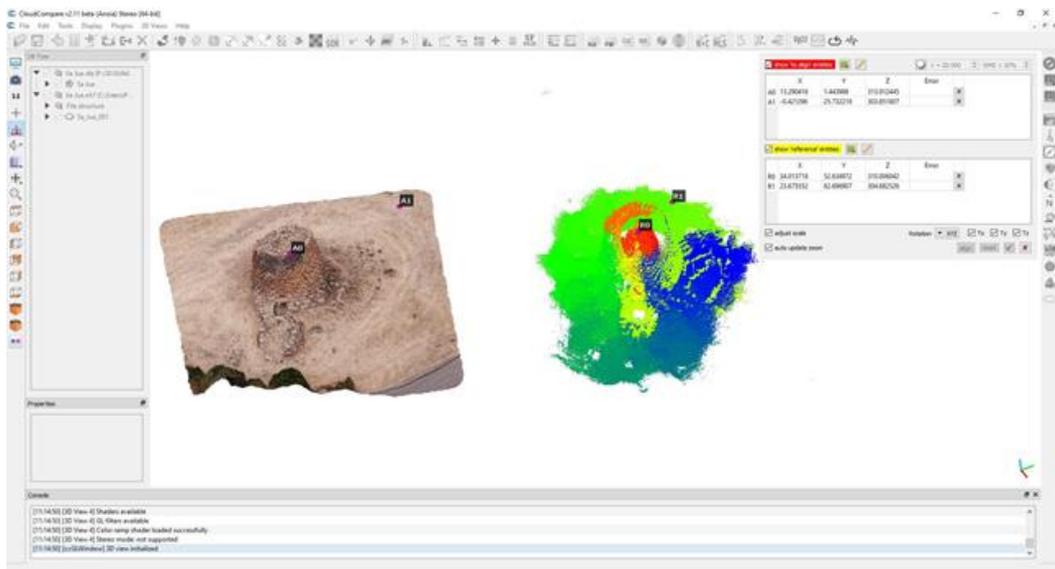


Fig. 4 - Allineamento di due nuvole di punti su CloudCompare.

CloudCompare

CloudCompare è un software avanzato e gratuito progettato per la visualizzazione e l'elaborazione di nuvole di punti e mesh. La sua versatilità e la capacità di gestire diversi formati lo rendono uno strumento prezioso per una vasta gamma di applicazioni; opera su diverse piattaforme, tra cui Windows,

IOS e Linux. Una delle principali caratteristiche di CloudCompare è la sua utilità nell'esecuzione di operazioni complesse come allineamento, riduzione del rumore, fusione e scala. L'allineamento è particolarmente critico quando si lavora con dati provenienti da diverse sorgenti o sessioni di scansione. CloudCompare consente agli utenti di combinare accuratamente nuvole di punti o mesh, garantendo una sovrapposizione precisa per risultati affidabili. La riduzione del rumore è un'altra funzione essenziale del software, che consente agli utenti di filtrare ed eliminare dati indesiderati o interferenze. Questo processo è cruciale per ottenere rappresentazioni pulite e dettagliate degli oggetti scansionati, migliorando la qualità complessiva dei dati e facilitando l'interpretazione delle informazioni. La fusione di dati è semplificata, facilitando la combinazione di informazioni provenienti da diverse prospettive o sessioni di acquisizione. Questo è particolarmente utile in progetti che richiedono l'integrazione di dati da varie fonti, contribuendo a ottenere una visione completa e coesa. Nella gestione dei fattori di scala offre strumenti avanzati per regolare e controllare il riferimento metrico dei dati. Ciò assicura la coerenza delle rappresentazioni e la precisione delle misurazioni, contribuendo a una visualizzazione chiara e comprensibile dei dati. Un elemento distintivo di CloudCompare è la sua efficacia nell'elaborazione di file di dimensioni limitate. Questo lo rende particolarmente adatto per il rilievo di piccoli oggetti, come componenti elettronici o reperti archeologici, dove la precisione e la gestione accurata dei dati sono fondamentali. Tuttavia, è importante notare che, nonostante la sua efficacia in contesti specifici, CloudCompare potrebbe non essere la scelta ottimale per progetti di rilievo architettonico che richiedono una maggiore capacità di elaborazione e gestione dei dati complessi. In tali casi, potrebbe essere necessario considerare soluzioni più specializzate. L'interfaccia utente intuitiva di CloudCompare facilita l'utilizzo del software, rendendolo accessibile sia a professionisti esperti che a utenti meno esperti nel campo della scansione 3D. Questa caratteristica contribuisce a rendere il processo di elaborazione dei dati più agevole ed efficiente. In sintesi, CloudCompare si presenta come uno strumento potente e flessibile per la manipolazione di nuvole di punti e *mesh*. La sua capacità di gestire diversi formati, la precisione nelle

operazioni di allineamento, la riduzione del rumore, la fusione di dati agevolata e la gestione accurata della scala lo rendono ideale per progetti che coinvolgono dati provenienti da piccoli oggetti. Tuttavia, è consigliabile valutare attentamente le esigenze specifiche del progetto prima di scegliere questo software, specialmente in contesti più complessi come il rilievo architettonico (GIRARDEAU MONTAUT 2019; www.danielgm.net/cc).

3.1.3. ZScan e ZScan Micro (*hardware e software*)

Il rilievo con ZScan avviene con l'utilizzo di componenti hardware e software ed è basato su un algoritmo proprietario della casa costruttrice Menci Software (MENCI *ET ALII* 2007). Si tratta di un sistema che necessita di una fotocamera digitale calibrata¹³, un'ottica fissa anch'essa calibrata¹⁴, un carrello a ricircolo di sfere con testa *tilt* (ARRIGHETTI 2012) che consente alla fotocamera di muoversi su una barra graduata in acciaio e di bloccarsi stabilmente sui punti fissi in essa presenti; il tutto deve essere posizionato su un treppiede, possibilmente in metallo per



Fig. 5 - Il sistema ZScan: treppiede, slitta graduata e fotocamera metrica.

ottenere una maggiore stabilità (Fig. 5). La calibrazione delle fotocamere e degli obiettivi può essere eseguita esclusivamente dalla casa costruttrice.

¹³ In questo caso è stata utilizzata una fotocamera reflex Canon Eos 400D. Con un'opportuna calibrazione può essere utilizzata qualsiasi fotocamera digitale.

¹⁴ Per il rilievo di oggetti di medie e grandi dimensioni si utilizza un'ottica fissa da 24 mm.

L'ottenimento del rilievo tridimensionale avviene in due fasi, entrambe fondamentali: il rilievo e l'elaborazione su software. La fase del rilievo è quella in cui vengono raccolte le cosiddette triplette di immagini: la fotocamera e l'obiettivo prescelto vengono posizionati sulla slitta graduata e da tre punti noti presenti sulla barra, partendo da sinistra, si scattano tre foto; la seconda foto deve essere scattata dal punto centrale della barra, mentre per la prima e per la terza i punti di rilievo devono essere equidistanti dal centro. Nel rilevare un oggetto è consigliabile, ma non vincolante e solo quando possibile, utilizzare sempre gli stessi punti nelle triplette rilevate. I punti noti utilizzati (la *baseline*) non possono essere registrati automaticamente sulle immagini e vanno quindi annotati. È molto importante non commettere errori di annotazione in questa fase, poiché il software non riuscirebbe a elaborare le triplette. La scelta della base, ovvero dell'equidistanza dei punti più esterni della tripletta, dipende dalla distanza dell'oggetto da rilevare; è responsabilità dell'operatore prendere questa decisione, che dovrà però fare riferimento a una tabella fornita dal produttore (Fig. 6). In ogni tripletta rilevata le immagini dovranno avere una vasta area di sovrapposizione, che per elementi particolarmente complessi deve superare il 60%. La tripletta dello ZScan è l'equivalente di una stazione eseguita con 3D laser scanner; questo significa che l'operazione di rilievo dovrà essere ripetuta fino a ricoprire l'intera superficie dell'oggetto, facendo sempre attenzione ad avere anche tra una tripletta e quelle adiacenti una vasta area di sovrapposizione.

Baseline	100 mm	200 mm	300 mm	500 mm	750 mm	1000 mm	2000 mm	3000 mm	5000 mm	7500 mm	10000 mm
Baseline 20 mm	0.04	0.16	0.37								
Baseline 50 mm			0.15	0.41	0.92	1.64					
Baseline 100 mm				0.20	0.46	0.82	3.27				
Baseline 150 mm					0.31	0.55	2.18	4.91			
Baseline 200 mm						0.41	1.64	3.68			
Baseline 300 mm							1.09	2.46	6.82		
Baseline 400 mm							0.82	1.84	5.12	11.51	
Baseline 500 mm								1.47	4.09	9.21	16.37
Baseline 600 mm								1.23	3.41	7.67	13.64
Baseline 700 mm									2.92	6.58	11.69
Baseline 800 mm									2.56	5.76	10.23
Baseline 900 mm									2.27	5.12	9.10

Fig. 6 - Tabelle di riferimento per la scelta della baseline.

ZScan non necessita dell'utilizzo di riferimenti esterni (che possono comunque essere inseriti con l'apposizione di punti ben visibili sulle immagini, *markers* o *target*) in quanto i dati metrici vengono elaborati dall'algoritmo con grande precisione sulla base dei punti noti della barra.



Fig. 7 - Rilievo con ZScan. Una tripletta e l'immagine *warp* (distorta) risultante.

La luce ambientale, naturale o artificiale, deve essere quanto più uniforme possibile; è sconsigliato l'uso del flash e si deve fare grande attenzione alla presenza di riflessi. Gran parte delle impostazioni della camera (tranne ISO e apertura focale) devono essere in modalità AUTO. Poiché le informazioni spaziali dell'oggetto si ottengono attraverso l'analisi e il confronto del valore RGB dei singoli pixel, il risultato finale, esattamente come nelle tecniche di rilievo fotogrammetriche tradizionali e digitali, è fortemente legato alla qualità e all'uniformità delle immagini. È quindi necessario fare grande attenzione all'esposizione, alla luminosità, al rumore, non solo in rapporto alla singola tripletta ma in tutto il rilievo. L'operatore che decide di utilizzare ZScan come strumento di rilievo deve avere delle buone basi di tecnica fotografica.

La seconda fase del lavoro consiste nell'elaborazione delle immagini con il software ZScan: l'interfaccia è molto intuitiva e si presenta come una tabella con sette colonne e un numero di righe che sarà pari al numero di triplette rilevate (Fig. 8); la suddivisione delle immagini in triplette sarà automatica e avverrà sulla base del nome. Nella prima colonna apparirà un'anteprima della tripla; nella seconda colonna il nome della tripla (es. IMG_0024_IMG_0025_IMG_0026); nella terza colonna sarà cura dell'operatore inserire la *baseline* precedentemente annotata, ovvero la distanza tra il primo e l'ultimo punto della barra; nella quarta colonna si ha l'indicatore della rettifica, rosso e con la scritta "*false*" prima dell'elaborazione della tripla, verde e con la scritta "*true*" dopo aver eseguito il passaggio fondamentale di rettifica della tripla (eseguita questa operazione si avrà la certezza della bontà del dato); nella quinta colonna vanno indicati eventuali punti di riferimento, che possono essere digitati con coordinate *xyz* o importati come file .ascii nel caso di rilievo con strumento topografico; nella sesta colonna si andranno invece a selezionare l'area di interesse (la sola dell'immagine a essere interessata dalla trasformazione) e la risoluzione della nuvola di punti, che sarà proporzionale alla qualità dell'immagine e al numero dei pixel; nell'ultima colonna, "point cloud", è presente il comando che permette di generare la nuvola di punti e la mesh texturizzata (è possibile avviare il processo di generazione delle nuvole di punti di tutte le triplette contemporaneamente).

Il risultato di tutte queste operazioni sarà un numero di nuvole di punti e modelli triangolati pari quello delle triplette rilevate. Per l'ottenimento del modello completo dell'oggetto sarà necessario utilizzare un software di elaborazione delle nuvole di punti o dei modelli ottenuti. Menci Software fornisce nel sistema il programma ZMap, ma è possibile, a seguito dell'esportazione dei dati, utilizzare qualunque software di editing 3D; in questo caso si è scelto il sistema open source CloudCompare. Le singole scansioni, una volta importate nel software, devono essere allineate; questo procedimento avviene grazie al riconoscimento di punti comuni (almeno tre) tra le nuvole di punti o i modelli digitali importati (Fig. 9).



Fig. 8 - ZScan: interfaccia del software dopo l'inserimento delle triplette e scelta della baseline.

L'allineamento è quella fase del lavoro in cui, a seguito della sovrapposizione dei vari modelli, è possibile verificare la reale precisione del dato ottenuto.

ZScan Micro è la versione di ZScan che permette di eseguire rilievi di precisione su piccoli oggetti o porzioni di superficie. Il principio di funzionamento è il medesimo, si differenzia l'hardware: il corpo macchina rimane invariato, mentre viene sostituita l'ottica fissa¹⁵. La grande differenza sta nell'utilizzo di una slitta graduata molto più piccola e precisa, controllata elettronicamente dal software ZScan Micro, per permette di ottenere precisioni sub millimetriche sulle scansioni.

¹⁵ Se ne utilizza, infatti, una più lunga, passando dall'obiettivo da 24 mm a quello da 60 mm.

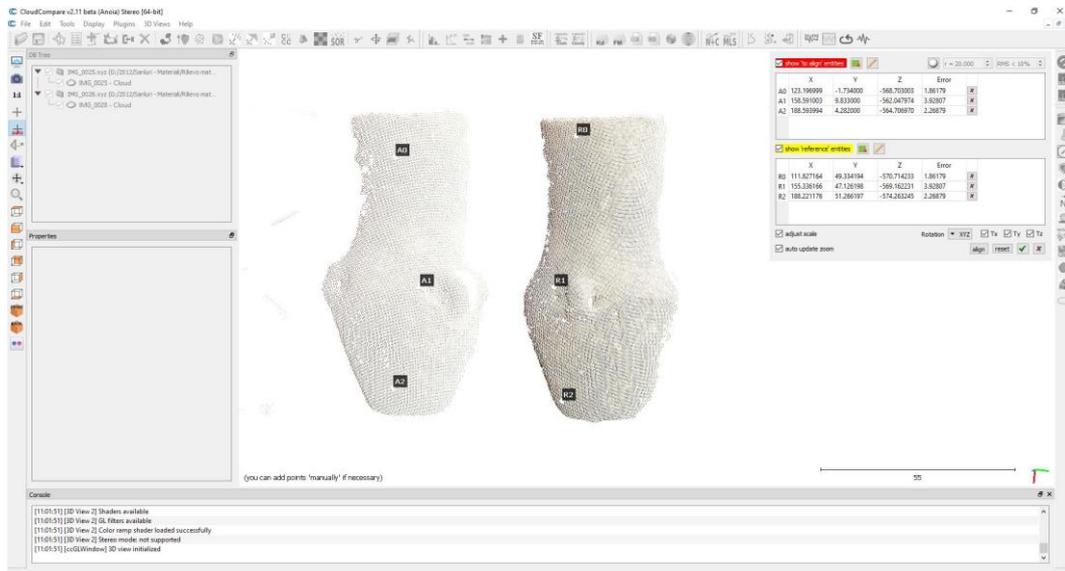


Fig. 9 - Allineamento delle nuvole di punti ottenute dalle triplette su CloudCompare.

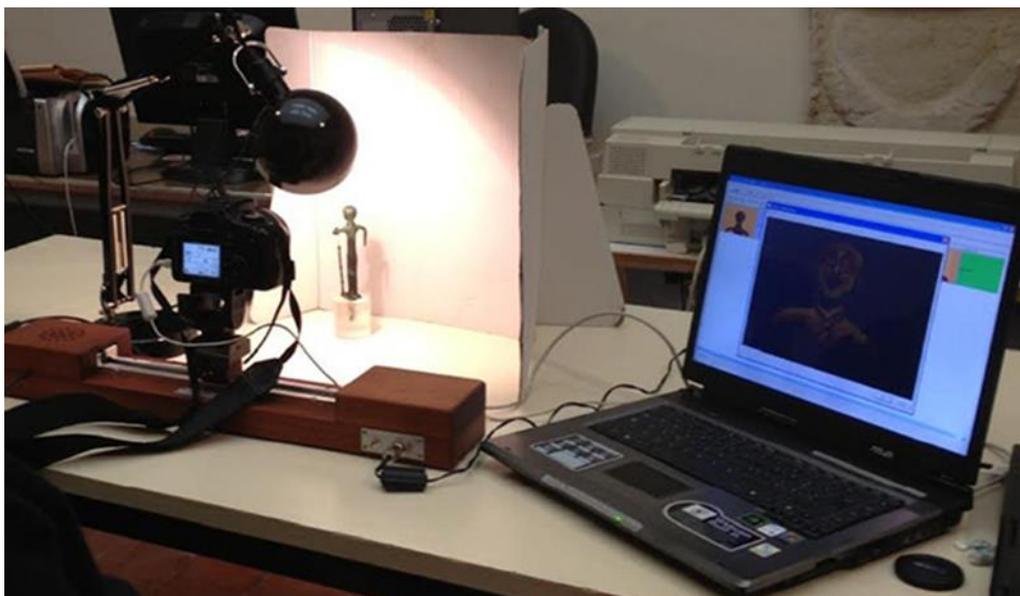


Fig. 10 - ZScan Micro: il sistema in fase di rilievo di un bronzo figurato.

Il sistema necessita del collegamento al PC e la base delle triplette, che viene sempre impostata dall'operatore, viene registrata automaticamente dal software. Una volta acquisite le immagini il procedimento di elaborazione e allineamento delle scansioni è il medesimo dello ZScan (Fig. 9).

3.1.4. *Structure from motion* (SfM)

L'utilizzo delle tecniche di rilievo fotogrammetrico digitale, note come *Structure from Motion*, nei cantieri archeologici e nello studio dei reperti è ormai consuetudine da quasi un decennio. L'avvento della fotografia digitale e soprattutto dei droni e la loro diffusione a costi più accessibili, sia per i ricercatori che per i liberi professionisti, ha consentito una rapida diffusione di queste tecnologie.



Fig. 11 - Alcuni degli strumenti utilizzati nel rilievo Structure from Motion: fotocamera digitale reflex, ottiche fisse da 24mm e 60mm, drone, target di riferimento.

Quella che oggi potremmo definire fotogrammetria digitale è una tecnica che si basa sulla *Computer Vision* (BARRILE ET ALII 2015) che permette ai calcolatori, con l'utilizzo di specifici software, di interpretare le informazioni presenti nelle immagini e nei video digitali, con la finalità di estrarne altri dati, nel nostro caso

di tipo spaziale¹⁶. I segreti del successo di questa tecnologia sono molteplici: la diffusione di software a costi accessibili o *open source*¹⁷, la rapidità di esecuzione del rilievo, la semplicità nell'uso della strumentazione e nella condivisione dei dati. L'attrezzatura utilizzata nei casi di studio presentati è in parte la medesima del sistema ZScan: una fotocamera digitale con due differenti ottiche¹⁸, due droni¹⁹ e la strumentazione topografica necessaria a rilevare eventuali punti di riferimento (*markers*). Nei casi descritti è stato utilizzato il software Agisoft Metashape, ma le procedure descritte sono simili per quasi tutti i sistemi più diffusi (Fig. 12).

Il rilievo con fotocamera digitale terrestre e drone

La tecnica di rilievo, sia essa terrestre o aerea, è abbastanza semplice e segue i principi fondamentali della fotogrammetria stereoscopica e quelli precedentemente descritti con il sistema ZScan, basati su una buona qualità dell'immagine e una vasta area di sovrapposizione; infatti, uno dei principi basilari delle tecniche di rilievo stereoscopiche e della fotogrammetria digitale, che ne eredita fondamenti e finalità, è che per collocare un punto nello spazio questo deve essere presente in almeno tre immagini (FORTUNATI ET ALII 2018). A differenza dello ZScan o di altri strumenti di rilievo di tipo ottico, la tecnologia SfM non necessita dell'utilizzo di ottiche calibrate o obiettivi metrici; i software più performanti contengono comunque una vasta libreria ricca di informazioni su un gran numero di fotocamere digitali, che vengono utilizzate nel calcolo dei modelli. È comunque consigliabile l'utilizzo di ottiche fisse e di qualità (MARCIALIS 2015).

Agisoft Metashape

¹⁶ La *Computer Vision* (CV) è una disciplina che sta anche alla base di altre tipologie di interpretazione dei dati provenienti da sensori digitali, come l'analisi termica o la fotointerpretazione.

¹⁷ Agisoft Photoscan; Agisoft Metashape; Autodesk 123D Catch; LiMapper, etc.

¹⁸ Canon EOS 400D, obiettivo Canon FS 24 mm, obiettivo Canon FS 60mm.

¹⁹ DJI Mavic Pro, DJI Air 2S.

Agisoft Metashape, successore delle varie versioni di Agisoft Photoscan, è uno dei programmi SfM più utilizzati nel rilievo archeologico. Esistono comunque altre opzioni molto valide, sia a pagamento che gratuite²⁰, le cui procedure di elaborazione sono del tutto simili. Terminata la raccolta delle immagini, dopo una eventuale selezione delle stesse, si passa direttamente all'utilizzo del software: dopo aver creato un gruppo di lavoro e aver importato le immagini si procede al loro allineamento (Fig. 12); questa fase può essere completamente automatica o in parte forzata dall'operatore con l'individuazione dei punti comuni (*markers*) nelle varie immagini caricate²¹.

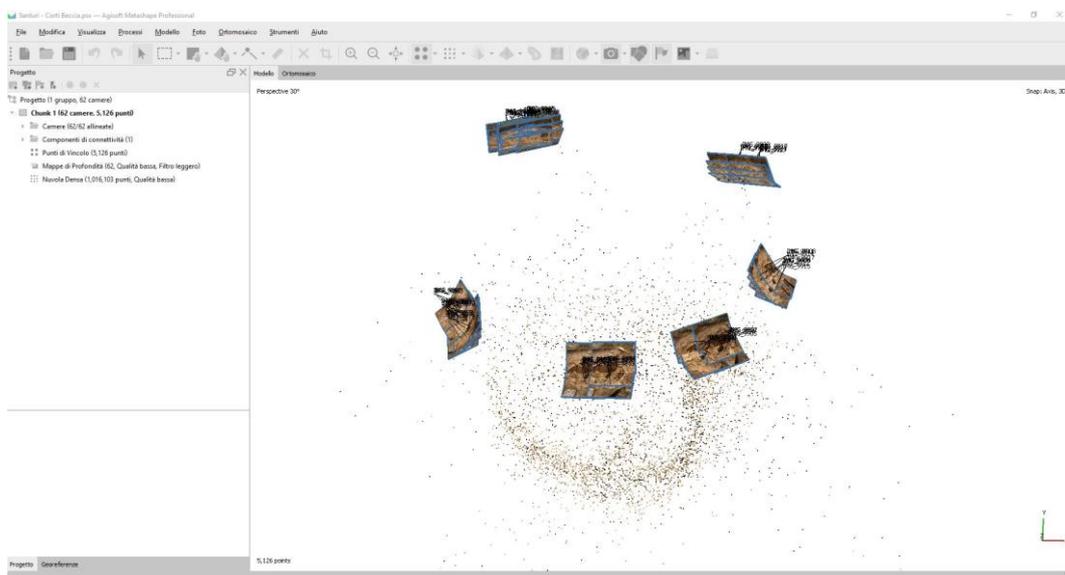


Fig. 12 - Agisoft Metashape: allineamento delle 62 immagini utilizzate per il rilievo della sepoltura di Corti Beccia con elaborazione della nuvola di punto sparsa.

I punti di riferimento possono essere utilizzati esclusivamente per facilitare il software nell'allineamento oppure, già in questa fase, per georeferenziare e scalare il modello che si andrà ad ottenere. Il *matching* delle immagini avviene

²⁰ Propeller Aero, LiMapper,

²¹ Se nei dati EXIF dell'immagine sono presenti le coordinate GPS del punto di presa, come avviene con gran parte dei droni, queste vengono utilizzate nell'allineamento dell'immagine come punti noti, permettendo di scalare e georeferenziare da subito il rilievo. La precisione finale dipende dal tipo di GPS presente nel drone: nella gran parte dei droni di fascia media sono presenti dei sensori poco precisi, ma è possibile acquistare con poche migliaia di euro strumenti dotati di GPS centimetrici, che non necessitano, quindi, di riferimenti esterni (Fig. 13).

grazie al confronto continuo delle similitudini presenti nei pixel (luminosità, colore, contrasto, etc.) per coppie di immagini; la durata del processo è proporzionale al numero di immagini, alla loro dimensione e ai parametri di calcolo prescelti. Al termine dell'operazione sapremo da subito quante immagini sono state allineate e potremo visualizzare la cosiddetta nuvola sparsa, una nuvola di punti a bassa risoluzione del modello che ci si accinge ad elaborare (Fig. 12). In questa fase sarà anche possibile verificare il corretto posizionamento del punto di presa nello spazio circostante al modello. Si passa quindi alla generazione della nuvola densa, la cui risoluzione (o densità) viene scelta in base all'utilizzo che si dovrà fare della nuvola.

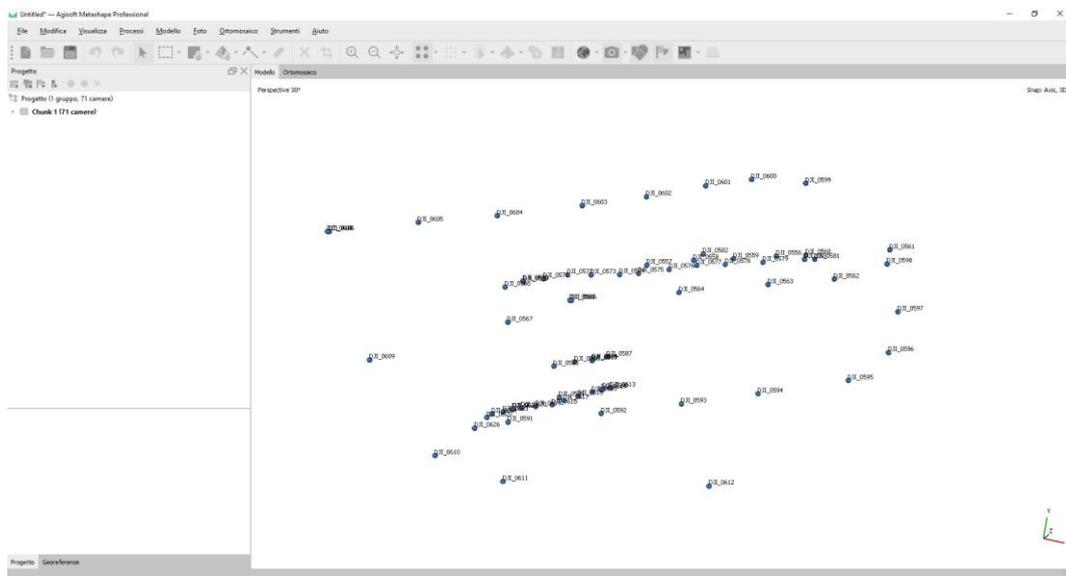


Fig. 13 - Agisoft Metashape: quando si utilizzano per il rilievo una camera metrica o un drone con GPS integrato le immagini vengono posizionate automaticamente nel loro punto di presa originario, con una sorta di pre-allineamento. L'utilizzo di droni con DGPS permette di ottenere modelli in scala egeoreferenziati.

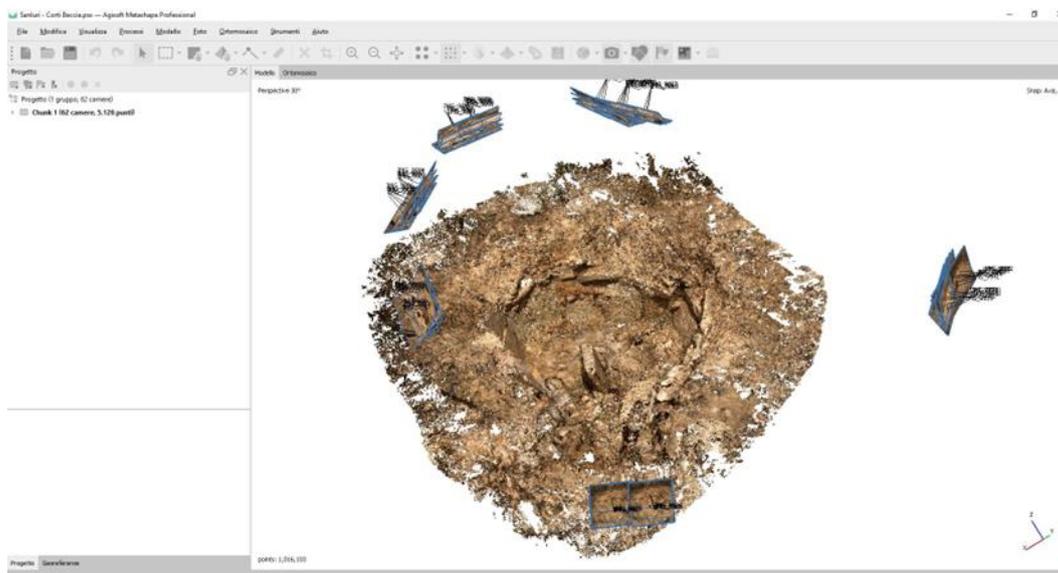


Fig. 14 - Agisoft Metashape: generazione della nuvola densa.

Terminata questa operazione sarà possibile generare il modello triangolato, la *mesh* (Fig. 15): anche in questo caso la risoluzione del modello deve essere scelta in base all'utilizzo che se ne dovrà fare (pubblicazione, estrazione di sezioni e piante dell'oggetto, prototipazione, etc.); la fase successiva è quella di *texturing*, processo attraverso il quale il software elabora una o più immagini da utilizzare come *texture* del modello, che danno un immediato effetto fotorealistico alla *mesh* (Fig. 16).

Due elaborati molto utili in campo archeologico, facilmente ottenibili con le tecniche di rilievo SfM quando si utilizzano le immagini aeree, sono le ortofoto e i DEM (*digital elevation model*, modelli digitali del terreno). Le ortofoto sono molto utili e oramai largamente utilizzate per l'elaborazione di planimetrie, sezioni o prospetti; i DEM forniscono, invece, dati altimetrici facilmente condivisibili con altri software (in particolare piattaforme GIS e CAD) e utilizzabili per elaborare, tra le altre cose, piani quotati con curve di livello (Fig.17).

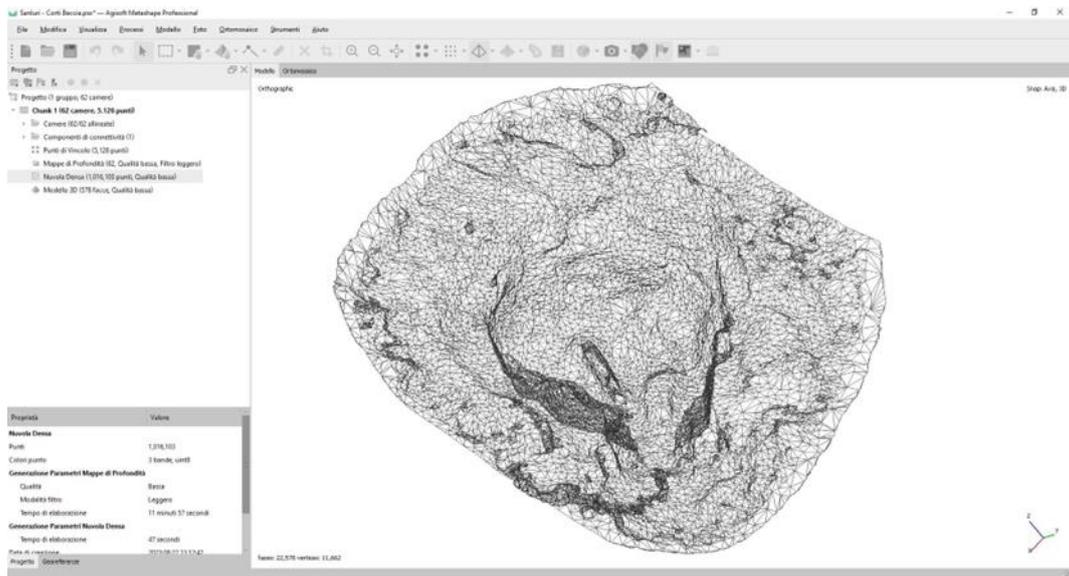


Fig. 15 - Agisoft Metashape: mesh visualizzata per triangoli.

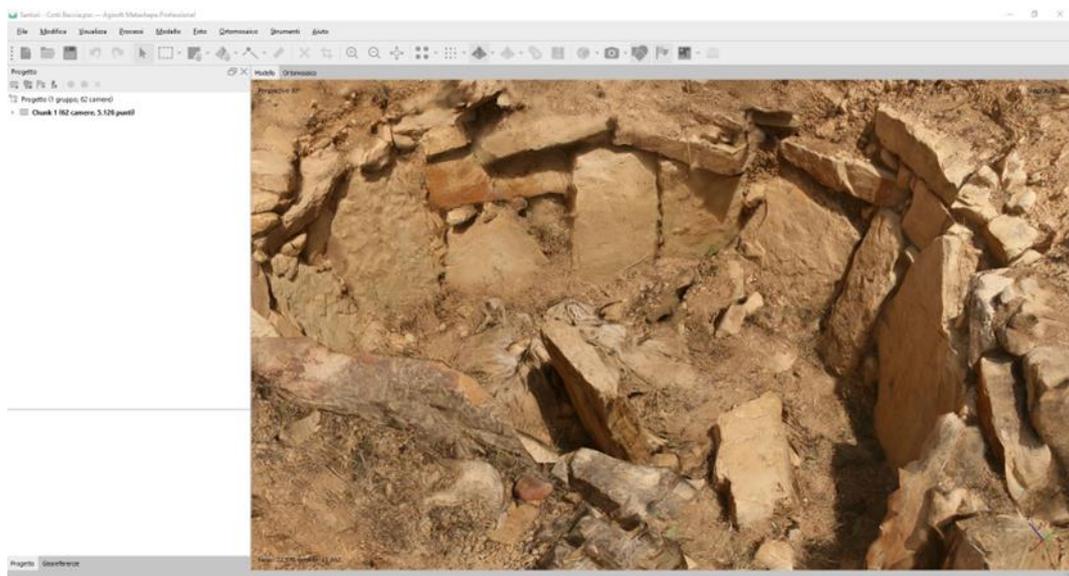


Fig. 16 - Agisoft Metashape: elaborazione della texture.

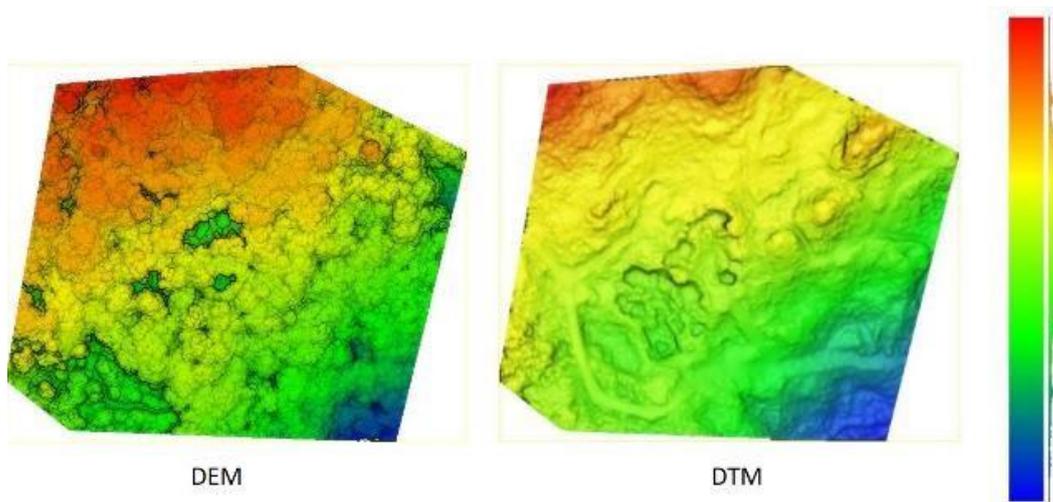


Fig. 17 - DEM, Digital Elevation Model, realizzato nell'ambito del Nuraghe Project nel territorio di Villa Verde, oggetto di indagini archeologiche dal 2013 (fonte: www.ispc.cnr.it).

3.1.5. GIS e WebGIS

I Sistemi Informativi Geografici (GIS) e il WebGIS sono entrambi strumenti che trattano dati geografici, ma con alcune differenze chiave: I GIS sono sistemi che ci consentono di organizzare, analizzare e visualizzare dati geografici attraverso mappe digitali, tramite un software installato su computer desktop che permette di lavorare con mappe e dati geografici; offrono funzionalità avanzate come l'elaborazione di dati, l'analisi spaziale e l'elaborazione di mappe tematiche. Sono utilizzati da professionisti come urbanisti, geografi, ingegneri, geologi. Tra i più diffusi si possono citare QGIS (*open source*), ESRI ArcGIS, Autodesk Civil 3D; anche Google Earth Pro, nella sua versione desktop, può essere considerato un GIS. Il WebGIS è una versione del GIS che permette di consultare mappe geografiche tramite il *browser web*, senza dover installare alcun software specifico sul computer. Utilizza dati cartografici reperibili online, come quelli di Google Maps, Bing Maps e di numerose piattaforme. È accessibile a un vasto pubblico, anche a utenti non specializzati (OLIVIERO ET ALII 2006)

WebGIS

Tra i WebGIS più diffusi e utilizzati vi è sicuramente Google Maps, un servizio di cartografia online fornito da Google che offre mappe dettagliate e interattive per ogni parte del globo. Con Google Maps, si possono cercare luoghi specifici, ottenere indicazioni stradali per raggiungere la tua destinazione, esplorare le vicinanze per trovare ogni genere di informazione, visualizzare immagini satellitari e molto altro ancora. Google Maps è diventato uno strumento fondamentale per la navigazione, l'esplorazione e la pianificazione di viaggi per milioni di persone in tutto il mondo.

Non meno noto è Bing Maps, il servizio di cartografia online offerto da Microsoft, che fornisce mappe dettagliate e una varietà di funzionalità per l'esplorazione geografica. Come Google Maps, consente agli utenti di ottenere indicazioni stradali per raggiungere la propria destinazione utilizzando diverse modalità di trasporto, come auto, trasporto pubblico, bicicletta o a piedi. Offre

tantissime immagini satellitari ad alta risoluzione di molte regioni del mondo, consentendo agli utenti di esplorare i dettagli geografici e topografici del territorio. Include una funzione di visualizzazione stradale che consente agli utenti di esplorare le strade in modo simile a Google Street View, sebbene la disponibilità possa variare in base alla regione. Si integra con altri servizi Microsoft, come Bing Search e Cortana, per fornire una vasta gamma di informazioni correlate ai luoghi cercati dagli utenti. Bing Maps offre API (*Application Programming Interface*) che consentono agli sviluppatori di integrare mappe e funzionalità di Bing Maps nelle proprie applicazioni e siti *web*.

Il Geoportale Nazionale è una piattaforma che fornisce accesso a dati geografici e servizi cartografici relativi al territorio italiano. Permette di consultare mappe ufficiali del paese, che includono informazioni dettagliate come confini amministrativi, strade, idrografia, aree protette e altro ancora. Consente l'accesso a una vasta gamma di dati geografici, compresi dati ufficiali e informazioni tematiche su vari settori come ambiente, agricoltura, trasporti, infrastrutture, ecc. Offre strumenti per visualizzare e interagire con le mappe e i dati geografici, consentendo agli utenti di esplorare il territorio e analizzare le informazioni in modo efficace. Contiene funzionalità di ricerca e interrogazione che consentono agli utenti di trovare luoghi specifici, identificare elementi geografici e accedere a informazioni dettagliate su determinate aree. Consente di visualizzare sia contenuti vettoriali che *raster*; tra i più utili le ortofoto e le tavole IGM.

Il Geoportale della Regione Autonoma della Sardegna offre una vasta gamma di mappe e dati geografici specifici per la regione della Sardegna che includono informazioni dettagliate come confini amministrativi, strade, punti di interesse, aree protette, dati ambientali, agricoli, turistici, culturali e altri dati tematici pertinenti. Offre strumenti interattivi che consentono agli utenti di visualizzare e interagire con le mappe e i dati, nonché di eseguire ricerche e interrogazioni per trovare informazioni specifiche. Consente di scaricare dati per l'uso personale o professionale, in conformità con le leggi sulla privacy e la proprietà

intellettuale. È fondamentale per la pianificazione del territorio, la gestione ambientale, lo sviluppo economico, la tutela del territorio.

GIS

Google Earth Pro è una versione avanzata e più potente di Google Earth, che offre una vasta gamma di funzionalità per l'esplorazione virtuale del nostro pianeta. È disponibile come software desktop gratuito, progettato principalmente per uso professionale, ma accessibile anche agli utenti comuni. Tra le sue caratteristiche principali vi è la possibilità di visualizzare immagini ad alta risoluzione, con accesso a immagini satellitari e aeree che consentono agli utenti di esplorare dettagliatamente luoghi in tutto il mondo. Si possono misurare distanze, aree e persino altezze di edifici o montagne utilizzando gli strumenti di misurazione avanzati. Permette di importare e visualizzare dati GIS per analizzare e confrontare informazioni geografiche provenienti da diverse fonti. È possibile elaborare video e immagini ad alta risoluzione utilizzando la funzione di creazione di filmati, ideale per presentazioni o progetti professionali. Si può accedere a immagini storiche e osservare i cambiamenti nel paesaggio nel corso del tempo. Queste funzionalità avanzate rendono Google Earth Pro uno strumento estremamente utile per professionisti come urbanisti, ingegneri, geografi, archeologi, nonché per appassionati di geografia e viaggiatori che desiderano esplorare il mondo in modo dettagliato e interattivo.

Autodesk Civil 3D è un software di progettazione e ingegneria civile sviluppato da Autodesk, progettato per supportare professionisti nel settore dell'ingegneria civile, dell'edilizia, della costruzione, dell'ambiente. Consente agli utenti di elaborare modelli tridimensionali dettagliati del terreno utilizzando dati topografici, punti di controllo, curve di livello e altre informazioni geospaziali. Permette la progettazione di strade, autostrade, ferrovie, ponti, canali, sistemi di drenaggio e altre infrastrutture civili utilizzando strumenti specifici per l'elaborazione di geometrie, allineamenti, profili, sezioni trasversali e altro ancora. Include strumenti per l'analisi e la simulazione di varie condizioni e scenari, come flusso idraulico, drenaggio delle acque piovane, visibilità, analisi di collisioni e altro ancora. Offre funzionalità per la redazione di documentazione tecnica dettagliata, comprese tavole di calcolo, relazioni di

progetto, piani di costruzione, planimetrie e altre annotazioni. Si integra con altre soluzioni software Autodesk, come AutoCAD e Revit, per un flusso di lavoro integrato dalla progettazione concettuale alla costruzione e alla manutenzione. Consente la collaborazione tra squadre di progettazione attraverso l'accesso condiviso ai dati e la possibilità di revisionare e commentare i progetti in tempo reale. Il suo punto di forza rispetto ad altri GIS è senza dubbio la il fatto di integrare potenti strumenti CAD. Autodesk Civil 3D uno strumento potente per progettare, analizzare e documentare in modo efficiente e preciso, contribuendo a migliorare la produttività e la qualità del lavoro nel settore.

Resumen Capítulo 3: Metodología de la investigación

El capítulo proporciona una descripción detallada de las herramientas y software utilizados en el estudio de los contextos analizados: herramientas topográficas (Estación Total, utilizada para mediciones precisas de las coordenadas XYZ, que puede operar de forma integrada o remota a través de dispositivos móviles; GPS Diferencial o DGPS, para mediciones al aire libre con precisión centimétrica); escáner láser 3D (de “diferencia de fase”, para levantamientos detallados con un alto número de puntos por segundo; de tiempo de vuelo, TOF, para levantamientos a larga distancia; de luz estructurada, para la documentación detallada de objetos pequeños o partes mecánicas, que se basa en el análisis de datos procedentes de un proyector de luz estructurada y cámaras de alta resolución para la triangulación); software de procesamiento: X-PAD Fusion (para la gestión de la estación total y Geopro Mercurio/Meridiana para la gestión del GPS diferencial); Autodesk ReCap (permite gestionar las nubes de puntos procedentes de escáneres 3D terrestres y LIDAR, con numerosas opciones de visualización y compartición de datos); Autodesk AutoCAD (vectorización y maquetación de nubes de puntos, ortofotos, mesh; posibilidad de integrar nubes de puntos en el entorno de dibujo); CloudCompare (gratuito, para visualización y procesamiento de nubes de puntos y mallas; gestiona varios formatos y opera en diferentes plataformas); sistemas hardware-software (ZScan y ZScan Micro, sistema compuesto por cámara métrica, barras graduadas y software de procesamiento que permite obtener modelos tridimensionales a partir de tripletes de imágenes); cámaras digitales y drones que, mediante el uso de software Structure from Motion o SfM, como Agisoft Metashape, permiten obtener modelos tridimensionales texturizados de alta calidad y precisión. Una serie de herramientas GIS y WebGIS para la investigación en macroáreas.

4. Storia degli studi

4.1. Gli sviluppi del rilievo archeologico negli ultimi trent'anni

Il rilievo archeologico, sia esso finalizzato alla restituzione grafica di piccoli manufatti, di siti archeologici più o meno estesi o di vaste porzioni di territorio, è uno strumento fondamentale per la ricostruzione delle opere e dei contesti del passato (Fig. 18). I continui mutamenti del paesaggio e il carattere distruttivo proprio e imprescindibile dell'indagine archeologica, in particolare dello scavo, fanno sì che le operazioni di documentazione siano parte fondamentale della ricerca archeologica. Tali concetti e tecniche devono necessariamente essere parte integrante della formazione dell'archeologo, che deve essere in grado di leggere e interpretare correttamente il dato acquisito. Nell'ultimo ventennio il lavoro dell'archeologo si è sempre più avvalso degli strumenti informatici, che permettono di archiviare ed analizzare il dato archeologico con sempre maggiore affidabilità e condivisibilità: che si tratti di un singolo reperto, di un sito o di una vasta porzione di territorio, l'informatizzazione dei dati su di esso disponibili, ha trasformato il modo di affrontare l'archeologia. Poiché il territorio è in continua evoluzione, ad opera sia dell'uomo che degli eventi naturali, e con esso la condizione e lo stato di conservazione delle emergenze archeologiche, l'archiviazione di immagini, rilievi e di qualsiasi altro dato ad esso associato è un'operazione di fondamentale importanza; in questo la fotografia aerea, i sistemi informativi geografici e il rilievo tridimensionale ad alta densità risultano fondamentali.

Qualche decennio fa la documentazione fotografica, grafica e topografica dei reperti, degli scavi archeologici e delle indagini territoriali era affidata a tecnici (geometri, ingegneri, architetti, fotografi), la cui formazione di base era caratterizzata da un'ottima conoscenza degli strumenti, delle tecniche di rilievo e documentazione, ma che necessitavano di un confronto continuo e serrato con l'archeologo sulle modalità di rappresentazione e lettura del dato. Negli ultimi

decenni si è invece formata la figura dell'archeologo rilevatore, che ha lentamente sostituito i tecnici nei cantieri archeologici o nei lavori di ricerca su scala territoriale. Tale figura, che non ha ancora ottenuto un vero e proprio riconoscimento di carattere professionale (non esistono, ad esempio, percorsi di laurea specialistica dedicati, ad esclusione di master universitari della durata di pochi mesi), è un archeologo che dedica gran parte del suo lavoro e delle sue attività di ricerca allo studio degli strumenti e delle tecniche di documentazione archeologica, quell'attività che permette di raccogliere, ordinare e esplicitare quei dati che altrimenti andrebbero persi nel corso delle attività di ricerca.



Fig. 18 - Quadrettatura realizzata in uno scavo archeologico per le attività di rilievo e documentazione (fonte: www.progettostoriadellarte.it).

Questo non significa che la tecnologia debba diventare l'oggetto della ricerca, ma per sfruttarla al meglio in campo archeologico essa deve essere sperimentata e confrontata (SFACTERIA 2016).

Negli anni Ottanta e Novanta del secolo scorso hanno avuto larga diffusione strumenti dedicati al rilievo topografico di precisione anche in campo archeologico: in prima battuta si è assistito all'introduzione nei cantieri delle

stazioni totali, evoluzione dei teodoliti, che grazie alla tecnologia della misurazione laser hanno permesso di velocizzare la raccolta sul campo dei punti rilevati e di ottenere precisioni sub-centimetriche (Fig. 19); a seguire, si è diffusa molto velocemente la tecnologia GPS, dapprima per la georeferenziazione su scala metrica (particolarmente utile nell'elaborazione di carte finalizzate al posizionamento e alla perimetrazione delle aree archeologiche) e, in seguito e grazie al miglioramento della tecnologia, all'utilizzo dei GPS differenziali per il rilievo di precisione in campo aperto. La diffusione del metodo di scavo stratigrafico, che necessita di una documentazione puntuale dei limiti, delle quote e degli elementi contenuti nello strato archeologico, ha allo stesso tempo incentivato l'uso dei nuovi strumenti e favorito la loro diffusione. Il rilievo manuale, decisamente gradevole da un punto di vista estetico e soggetto alla sensibilità interpretativa del disegnatore, risultava ormai di difficile utilizzo sia per la necessità di raccogliere i dati più velocemente sia perché di difficile e più lenta consultazione, a causa dei limiti dovuti all'utilizzo del supporto cartaceo (BIANCHINI 2008).

Alla diffusione di questi strumenti, che permettono di rilevare per punti singoli e necessitano, comunque, di una forte capacità interpretativa dell'archeologo disegnatore, si è affiancata la diffusione dei software di restituzione, i CAD (*computer-aided drafting*, disegno tecnico assistito dall'elaboratore²²) o, su scala territoriale, i software GIS (*Geographical Information System*, sistemi informativi geografici), che oggi tendono sempre più a confluire in un unico sistema²³. Con l'avvento delle nuove tecniche di rilievo e documentazione, il disegnatore, o archeologo rilevatore (come verrà definito da ora in avanti), si è ritrovato a dover fare i conti con tutte quelle difficoltà tipiche di chi tenta di introdurre in un campo molto legato alla tradizione letteraria e di formazione tipicamente umanistica, argomenti che in passato avevano poco a che vedere con il percorso di studi di base dell'archeologo.

²² www.auotodesk.it

²³ Ne rappresentano esempi di grande successo e largamente diffusi Civil 3D, Autocad Map 3D, QGIS, ArchGIS.



Fig. 19 - - Stazione totale in un cantiere archeologico (fonte www.aretecooperativa.com).

Il rilevatore degli anni Ottanta e Novanta, che ha introdotto nei cantieri archeologici i nuovi strumenti topografici come stazioni totali, GPS e software CAD, si è dovuto scontrare con un mondo fatto fino ad allora di fili a piombo, carta millimetrata lucida, china e stampe di ogni formato; il collega degli inizi degli anni Duemila che, come lo scrivente, ha contribuito alla diffusione del rilievo tridimensionale, si è confrontato con un mondo in parte legato alla tradizione, in parte semplicemente impreparato all'utilizzo di hardware, software e strumenti di condivisione ancora poco diffusi. L'esperienza nei primi anni di attività è stata, in tal senso, particolarmente ricca di episodi significativi e difficoltà. Il mondo del rilievo è in continua evoluzione e l'archeologo rilevatore deve essere in grado di apprendere velocemente le tecniche di utilizzo di strumenti e software che vengono continuamente introdotti sul mercato. Nel momento in cui una nuova tecnologia viene applicata alla ricerca archeologica non si hanno a disposizione studi, ricerche o corsi di formazione per un utilizzo immediato sul campo; questo perché quasi tutti gli strumenti e le applicazioni

nascono per usi di tipo ingegneristico (civile o ambientale) o architettonico, per poi essere adattati ad un utilizzo in archeologia, che nelle sue prime battute richiede un periodo più o meno lungo di adattamento e sperimentazioni. A quarant'anni dall'introduzione degli strumenti topografici e dei software CAD, a quasi vent'anni dalla diffusione dei primi 3D laser scanner e della fotogrammetria digitale, si ha quasi il problema opposto: è infatti tale la quantità di lavori pubblicati, soprattutto online, e di risorse consultabili che è necessario fare una selezione attenta di quello che è il materiale utile allo studio e di quello che è, al contrario, di bassa qualità e utilità (CAMPANA-SORDINI 2006)²⁴.

²⁴ Il lavoro in questione evidenzia come già nel 2006, a pochi anni dall'introduzione dei 3D laser scanner e del *remote sensing*, fosse necessario fare una selezione delle risorse utili allo studio e alla ricerca.

4.2. La fotografia aerea a bassa quota

La fotografia aerea è indubbiamente la prima forma di telerilevamento utilizzata: i primi esperimenti, risalenti all'Ottocento, si ebbero con l'utilizzo delle mongolfiere e dei palloni aerostatici. Pioniere in Italia fu l'architetto e archeologo Giacomo Boni (PUDDU-PALLAVER 1987), che documentò gli scavi al Foro Romano tra il 1899 e il 1906 (Fig. 20). Oltre ad essere stato uno dei primi ad utilizzare il metodo stratigrafico nello scavo, con la collocazione nello spazio dei reperti rinvenuti, riconobbe l'utilità delle piante e della documentazione fotografica in relazione ai resti antichi. Nel 1907 promosse l'istituzione del Gabinetto Fotografico Nazionale; nello stesso anno da una serie di foto acquisite dall'Aeronautica militare fu possibile individuare nelle aree di Porto e Fiumicino il bacino del porto di Claudio e di un forte imperiale interrato risalente al XVI secolo. Nel decennio successivo, sempre grazie alle riprese eseguite dal pallone, si documentarono gli scavi di Ostia e di Pompei, mentre nel Regno Unito si rilevava dall'alto il sito di Stonehenge. L'uso della fotografia aerea per scopi bellici nel corso del primo conflitto mondiale permise lo sviluppo delle tecniche di fotointerpretazione e mise a disposizione degli studiosi una grande quantità di tavole fotografiche, con ricognizioni sistematiche di aree molto vaste.

Fu così che in Europa e nel Medio Oriente si documentò la presenza di importanti aree archeologiche: in Macedonia, Palestina, nel Sinai si scoprirono numerosi abitati; la Mesopotamia fu oggetto di importanti ricerche di topografia antica, furono individuati i porti di Tiro e Sidone. Nelle aree desertiche e scarsamente popolate si riuscì a dimostrare l'enorme utilità del metodo (PICCARRETA 1987, 1994, 2000). Ma fu negli anni tra le due guerre che l'archeologo inglese O.G.S. Crawford, in collaborazione con il maggiore G.W.G. Allen, applicò sistematicamente la fotografia aerea alla ricerca archeologica, ponendo le basi per i successivi sviluppi della fotointerpretazione (Fig. 21). Essi riuscirono ad individuare anche in aree densamente popolate e coltivate un gran numero di insediamenti (preistorici e protostorici) e a ricostruire la topografia di epoca romana (CRAWFORD 1924).



Fig. 20 - Veduta dei fori imperiali da pallone aerostatico (fonte: roma.repubblica.it).



Fig. 21 - O.G.S. Crawford, "Cropmark" di cerchi di legno (Woodhenge) e siti associati (fonte: www.englishheritage.org.uk).

Giuseppe Lugli, e in seguito l'allievo Ferdinando Castagnoli, portarono l'utilizzo della fotografia aerea nella penisola italiana ad essere non solo un semplice mezzo di documentazione ma un vero e proprio strumento di studio e di indagine, con l'introduzione di tecniche di fotointerpretazione avanzata. Egli passò dai primi voli con pallone (1919) all'utilizzo delle immagini aeree per effettuare vere e proprie ricognizioni; si ricordano i suoi lavori sui Colli Albani, Anzio, Ardea, Lavinio, Lanuvio, in Puglia e nel crotonese. Si sciolse in tal modo ogni dubbio sull'effettiva applicabilità della tecnica fotointerpretativa anche nelle aree fortemente antropizzate (CASTAGNOLI 1961, 1969; LUGLI 1939). Il progetto di Lugli subì un brusco arresto con l'inizio della Seconda guerra mondiale; in compenso le ricognizioni aeree eseguite per scopi bellici, così come avvenne nel corso del precedente conflitto, misero a disposizione degli archeologi e studiosi di topografia antica una enorme quantità di dati da analizzare. Fu così che si distinsero per gli studi portati avanti nell'Africa romana J. Baradez (Algeria, Tunisia, Marocco), A. Caillemer e R. Chevallier (ancora in Tunisia, da Biserta a Sfax e da Capo Bon a Teboursouk, su oltre 2000 ettari di superficie); in Medio Oriente si ricordano A. Reifemberg per la Palestina, A. Dothan in Israele e F. Schmidt in Iran (BARADEZ 1935, 1949; CAILLEMER 1955; CHEVALLIER 1971; PICCARRETA 1987). Ma è soprattutto nel continente europeo che vi fu una vera e propria esplosione del fenomeno: negli anni '40 e '50 furono John Bradford e William Hunt ad applicare le immagini rilevate nelle ricognizioni militari alla ricerca archeologica, identificando centinaia di siti che si celavano sotto i campi di cereali della Daunia, in Puglia (RADCLIFFE 2006), un territorio che per decenni è stato campo di sperimentazione dell'archeologia aerea in Italia (Fig. 22).

Il loro lavoro rimase purtroppo incompleto, ma il filo della ricerca fu ripreso più volte dai vari G. Schmiedt, G. Alvisi, G.D.B Jones, D. Riley e dall'Università di Foggia (ALVISI 1962, 1979, 1989; JONES 1980; RILEY 1992; SCHMIEDT 1964, 1965, 1965-1967, 1970, 1973, 1974, 1975, 1985, 1989).

Il grande merito di Bradford fu quello di riconoscere che "il requisito dominante nello studio del paesaggio antico sta nella sua totalità"; egli ha adottato un metodo che non vede l'archeologia aerea sostituirsi ad altre norme di ricerca,

semmai le integra, completando le ricognizioni aeree con *survey* estensive ed intensive (BRADFORD 1947, 1949, 1950, 1957; BRADFORD-WILLIAMS-HUNT 1946).



Fig. 22 - Villaggio neolitico individuato dalle ricognizioni aeree di Jhon Bradford (fonte: www.amaraterramia.it).

Interessante l'applicazione del metodo da parte di Giovanna Alvisi nella ricostruzione della viabilità antica nella Daunia e di Dinu Adamesteanu in Sicilia, che hanno permesso di riconoscere come la viabilità di epoca romana seguisse le vie di collegamento dei villaggi preistorici (ADAMESTEANU 1962; ALVISI 1962, 1979, 1989). A Dino Adamesteanu va riconosciuto il grande merito di aver dato l'impulso alla fondazione dell'Aerofototeca Archeologica, di cui fu il primo direttore. Trasferitosi a Roma nel 1959, impossibilitato ad abbandonare il proprio lavoro direttamente sul campo, organizzò le basi dell'Aerofototeca, curandone direttamente l'impostazione. Tale laboratorio, unico nel suo genere in Europa, fu dotato di strumenti per il trattamento del materiale aerofotografico, dando l'avvio ad un'opera esemplare di ricerca, sfruttando sia il materiale militare che quello ad uso civile, che si rivelò di fondamentale importanza per

lo studio delle più conosciute aree archeologiche. A Adamesteanu si devono inoltre i primi lavori su vasta scala di quella che oggi si potrebbe definire archeologia preventiva, con importanti campagne di indagine nelle zone allora interessate da grandi opere pubbliche, prevenendo la loro interferenza sulle aree archeologiche. Si ricordano gli studi relativi alla scoperta della città di Spina ed alla determinazione dell'assetto del territorio del limitrofo delta del Po (ADAMESTEANU 1962, 1964). Dal 1964 al 1990 la direzione della Biblioteca di Fotografia Aerea fu affidata all'archeologa Giovanna Alvisi; il comitato era, tra l'altro, responsabile del miglioramento del sistema tradizionale per la parallelizzazione dei dati provenienti dalla fotografia aerea e su questa base è stato elaborato il catalogo digitale. Sotto la sua guida, gli interessi si sono ampliati dal campo dell'archeologia allo studio dell'intera regione, con particolare attenzione all'ambiente, alla conservazione dei siti storici e del patrimonio. Fece anche una vasta opera di promozione dell'archivio attraverso l'acquisto di una speciale collezione di foto aeree (ALVISI 1973-1974, 1976-1977).

Negli anni a seguire si assiste ad una progressiva diffusione della ricognizione archeologica aerea, con la nascita di nuovi sistemi di documentazione (infrarosso, falso colore, LIDAR) e l'utilizzo di piattaforme satellitari. È in questa fase che il concetto di fotografia aerea appare troppo limitato e viene coniato dalla geografa statunitense Evelyn Pruitt il termine *Remote Sensing* (CAMPANA 2003; FUSSEL ET ALII 1986), telerilevamento, che definisce quella scienza che studia l'insieme delle tecniche di acquisizione, elaborazione ed interpretazione dei dati che permettono di studiare gli oggetti senza entrare in contatto con essi. Tutti gli esperimenti avviati a partire dagli anni Sessanta sono stati definiti come un modo per estendere le nostre capacità di recepire informazioni e dati a distanza (PICCARRETA 1994). Tutti i sistemi di raccolta di informazioni a distanza possono essere considerati come i predecessori del telerilevamento, inclusa la fotografia aerea a bassa quota. In archeologia sono stati riconosciuti vari livelli di scala nell'uso del telerilevamento, la cui scelta è propedeutica alla ricerca. D.L. Clarke ne indica tre: scala micro e semi-micro nell'analisi *intra-site*, macro nelle aree più vaste. Nel presente lavoro si

approfondiscono tutte e tre le scale, finalizzate alla ricerca *intra-site* e *extra-site* (CLARKE 1978).

L'uso della fotografia aerea rimase per molto tempo appannaggio di pochi, sia a causa degli elevati costi della strumentazione necessaria (la diffusione dei droni a basso costo risale infatti all'ultimo decennio) sia perché la legislazione dei vari stati non sempre ha incoraggiato la diffusione del volo privato (PICCARRETA 1987, 1994, 2000). In Italia una legge del 1939 regolava le attività di ripresa aerofotografica, riservandola ad istituti specialistici e dedicati come l'Aerofototeca Nazionale, l'Istituto Geografico Militare e il CNR, impedendo di fatto lo sviluppo su larga scala di questa tecnica. La legge fu fortunatamente abrogata nel 2000, permettendo lo sviluppo al quale si assiste ancora oggi. A partire dagli anni Ottanta e fino ai primi anni del nuovo millennio la fotografia aerea a bassa quota vide nuovamente come protagonisti aquiloni e palloni aerostatici, due strumenti conosciuti e utilizzati da tempo, che hanno avuto una discreta diffusione in campo archeologico soprattutto grazie alla loro associazione alle fotocamere digitali e alla possibilità di controllarle da remoto. Entrambi gli strumenti hanno dei costi accessibili ma il loro utilizzo è tutt'altro che semplice. L'equipaggiamento per la fotografia aerea è costituito dal cosiddetto KAP (Kite Aerial Photography) e i KAPers ne sono i costruttori e utilizzatori; questo kit si compone di aquilone (*kite*), cavo (*line*), avvolgicavo (*winder* o *reel*), sistema di sospensione della fotocamera (*rig*) e fotocamera (ABER *ET ALII* 2002; BITELLI *ET ALII* 2003; BOGACKI *ET ALII* 2008; NANNINI 2015). Il successo dell'aquilone nella documentazione fotografica degli scavi è dovuto sia al costo decisamente contenuto che alla possibilità di coprire quella distanza dal suolo che va tra i 15 metri e i 100 metri, quindi oltre a quella che si può raggiungere con un'asta telescopica e più bassa di quella che si poteva raggiungere senza rischi con un drone ad ala fissa, ottenendo in tal modo un'ottima risoluzione dell'immagine (BLASCO *ET ALII* 2016). Gli aquiloni adoperati sono solitamente senza stecche e difficilmente distruttibili, non richiedono montaggio o manutenzione e assicurano un volo stabile ed efficiente anche in presenza di vento forte. Decollano facilmente e stanno in aria entro un *range* di vento molto ampio. Ripiegati prendono poco spazio e sono quindi

particolarmente indicati per il trasporto. La fotocamera (a controllo remoto o temporizzata) viene appesa ad un cavo (*line*), non direttamente all'aquilone, con un sistema di aggancio basculante (il corrispondente della *gimbal* nel drone multirotores) che permette di modificarne la quota. L'aquilone risulta essere comunque uno strumento con grandi limitazioni, difficilmente utilizzabile in ambito urbano, in presenza di alberi o in aree di fondovalle (BEAUFFORT-DUSARIEZ 1995; BECOT 1995). I palloni aerostatici utilizzati per il *balloon mapping* sono solitamente di tipo frenato, per evitare la perdita o la rottura dell'attrezzatura fotografica, gonfiati ad elio, a doppio strato per una maggiore tenuta e sicurezza e con un volume di 2,5/3 metri cubi (MAURO 2015). Se il costo dell'attrezzatura resta abbastanza contenuto non si può dire altrettanto per quello del gas, decisamente alto e variabile, che spinge spesso gli utilizzatori a dotarsi di un furgone per il trasporto dell'attrezzatura, evitando così di sgonfiare del tutto il pallone e riutilizzando parte del gas per i voli successivi. I sistemi di sospensione della fotocamera sono di diverse tipologie: il più economico e artigianale è quello della "bottiglia forata", con la fotocamera che viene inserita all'interno di una bottiglia in PET forata alla base e agganciata tramite un moschettone e una corda elastica al pallone, che la protegge dagli urti e ne consente una posizione di ripresa quasi zenitale in assenza di vento; il secondo sistema è quello del "Picavet" (utilizzato dal 1912, che deve il proprio nome suo inventore, Pierre Picavet), anch'esso abbastanza economico e facile da realizzare, che permette di sostenere la fotocamera e mantenerla in posizione orizzontale per mezzo di un sistema di fili connesso ad un telaio a forma di croce; il terzo sistema, più efficace e allo stesso tempo più costoso, è quello del *gimbal*, lo stabilizzatore a giunto cardanico (MAURO 2014). Tra i primi esperimenti a ridosso degli anni Ottanta si segnala l'ottimo lavoro di mappatura di antichi sentieri nella Grecia continentale ad opera dell'Università del Minnesota (JOHNSON 1978), mentre nell'ultimo ventennio ricordiamo gli esperimenti nei castellieri dell'isotino e del carso triestino (FAVRETTO-MAURO 2015; MONTANARI KOKELJ 2015), quelli di documentazione delle rovine di Patara in Turchia (ALTAN ET ALII 2004). In Sardegna due importanti lavori, realizzati anche con l'ausilio di immagini da pallone aerostatico, sono quelli

pubblicati da F. Nieddu, con uno studio degli insediamenti preistorici risalenti all'Eneolitico (NIEDDU 2014), e da G. Alvito e A. Moravetti, di carattere documentale e divulgativo, con una raccolta di immagini di importanti siti in tutta l'isola (ALVITO-MORAVETTI 2010).

Gli sviluppi della fotointerpretazione aerea e terrestre hanno portato negli ultimi anni alla diffusione di interessanti applicativi anche in campo archeologico, come il software ImageJ e la sua estensione DStretch, che permettono attraverso complessi algoritmi di evidenziare su un'immagine digitale i residui di tracce di pigmento. Questa tecnica ha prodotto risultati interessanti nello studio delle pitture rupestri (DELIGIA ET ALII 2014).

A partire da almeno un decennio la fotografia aerea a bassa quota ha subito una delle più grandi rivoluzioni della sua lunga storia, grazie alla diffusione su larga scala degli UAV o SAPR, aeromobili a pilotaggio remoto, meglio conosciuti come droni²⁵. Questi apparecchi, muniti di fotocamera e radiocomando, la cui storia ha inizio molti decenni fa grazie alle sperimentazioni prevalentemente in campo militare e spaziale, consentono di effettuare riprese fotografiche di dettaglio e di precisione (MINUCCI 2018). I droni si distinguono in due grandi categorie: ad ala fissa e multirottore. La prima delle due tecnologie ad avere una discreta diffusione è stata quella dei droni ad ala fissa, arrivati per primi sul mercato a costi accessibili, sia per gli appassionati che per gli studiosi e i liberi professionisti. La tecnica di volo di questi apparecchi, simile a quella dei già diffusi aeromodelli radiocomandati, ne ha agevolato la diffusione. I velivoli ad ala fissa, particolarmente adatti alle ricognizioni di tipo lineare e meno ai rilievi di dettaglio, continuano a giocare un ruolo importante nella documentazione aerea del paesaggio archeologico. È però con i droni multirottore che si ha finalmente una diffusione pressoché capillare della tecnica di documentazione aerea e del rilievo basato sulle moderne tecniche di fotogrammetria digitale (*Structure from Motion*). Il loro successo è dovuto ancora una volta non solo alla diminuzione del costo del velivolo e alla sua semplicità d'utilizzo, ma

²⁵ Questi sono conosciuti con nomi diversi: UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), RPV (*Remotely Piloted Vehicle*), ROA (*Remotely Operated Aircraft*), UVS (*Unmanned Vehicle System*), RCH (*Remote Controlled Helicopter*).

soprattutto alla compatibilità con fotocamere ad alta risoluzione sempre più leggere e alla nascita di nuovi software di elaborazione delle immagini. La chiave del successo dei droni multirottore è stata soprattutto la possibilità di portare in volo e gestire a distanza e in piena sicurezza diverse tipologie di sensori (fotocamere, camere metriche, termocamere, 3d scanner, etc.). A poco più di un decennio dalla diffusione su scala commerciale il loro utilizzo si è diffuso oltre che in archeologia anche nelle analisi ambientali, nello studio dei cambiamenti climatici, in agricoltura e, naturalmente, in topografia e cartografia (BONNIN *ET ALII* 2018; HUGENHOLTZ *ET ALII* 2013; LOPEZ-MULERO PÁZMÁNY 2019; RAOULT *ET ALII* 2018; WHITEHEAD *ET ALII* 2014). Sono sempre più frequenti le pubblicazioni di studi di carattere archeologico che si incentrano sui risultati ottenuti con l'utilizzo dei droni, soprattutto nelle riviste cartacee e digitali dedicate: l'”*Open Access Journal Drones*”²⁶, pubblicato a partire dal 2017, è dedicato a lavori e progetti di vario ambito effettuati con l'utilizzo di droni, non solo in ambito archeologico; la rivista “*Archeologia Aerea. Studi di Aerotopografia Archeologica*”, fondata nel 2004 da Giuseppe Ceraudo e Fabio Piccarreta dà spazio a ricerche di carattere archeologico basate sull'utilizzo delle tecniche di telerilevamento, seguendo la disciplina fin dagli esordi dell'era digitale e dando ampio spazio alla storia della materia²⁷; “*Archeologia e Calcolatori*” dal 1990 opera in da osservatorio internazionale di aspetti teorici e metodologici dell'informatica applicata all'archeologia, inclusi gli studi di carattere aerofotogrammetrico; la “*Conferenza Nazionale di Geomatica e Informazione Territoriale ASITA*”, che pubblica con cadenza annuale i risultati del confronto tra specialisti nei vari campi della Geomatica²⁸.

²⁶ www.mdpi.com/journal/drones

²⁷ <https://www.archeologiaaerea.it>

²⁸ <https://www.asita.it/conferenza>

4.3. Il rilievo archeologico tridimensionale

I 3D laser scanner terrestri

Il rilievo con 3D laser scanner è un'applicazione piuttosto recente, sviluppatasi nell'ultimo quarto del secolo scorso e applicata all'archeologia e ai Beni Culturali fin dall'inizio del nuovo millennio (BARIBEAU ET ALII 1992). La bibliografia sull'argomento è ormai piuttosto vasta, tanto da essere quasi dispersiva, non sempre con lavori di alto livello né utili al confronto. Anche la rete è ricca di contenuti, pubblicati e aggiornati continuamente dalle case costruttrici e dai distributori degli strumenti, oltre che dai ricercatori e dai professionisti che ne fanno uso (CAMPANA-FRANCOVICH 2006). La diffusione dei 3D laser scanner e degli strumenti informatici ad essi collegati ha dato immediatamente un grande contributo allo studio e alla valorizzazione del patrimonio culturale, anche sotto l'aspetto delle caratteristiche fisiche dei beni, in termini sia storico-artistici che stilistici (GABRIELLI-PELOSO 2004). L'attenzione degli studiosi si è rivolta da subito ai 3D scanner di tipo terrestre (così definiti per distinguerli dagli strumenti utilizzati sugli aeromobili o sui mezzi di movimento in genere), soprattutto a quelli dotati di tecnologia TOF (*time of flight*, tempo di volo); tali strumenti consentono di ottenere delle nuvole di punti (*point cloud*) grazie ad un sistema composto da uno specchio rotante, che calcola l'angolo di inclinazione della battuta, e da un emettitore, che misura le distanze rilevando il tempo che il raggio laser impiega a colpire una superficie e a ritornare al punto di emissione; in seconda battuta si è assistito alla diffusione sul mercato degli strumenti a differenza di fase, che sfruttano alcuni dei principi di funzionamento dei TOF, con la sostanziale differenza del metodo di calcolo della distanza, che avviene misurando la differenza di fase tra l'onda emessa e quella ricevuta (BARTOLUCCI 2009). Tutte queste informazioni metriche possono essere georeferenziate con l'utilizzo di punti noti o di strumentazione topografica, talvolta integrata. L'accuratezza delle nuvole di punti rilevate ha permesso di ottenere nell'immediato importanti risultati sia nel campo della tutela (verifiche statiche e morfologiche ripetute nel tempo) che della

valorizzazione, con elaborazione di modelli virtuali realistici e attendibili (GABRIELLI-PELOSO 2005). La rappresentazione tridimensionale aveva ormai a disposizione un nuovo strumento, utile per approfondire con maggiore rigore scientifico vari aspetti legati alle tecniche costruttive degli edifici, alla loro conservazione, alla documentazione dell'attività archeologica sotto vari aspetti e alla didattica (GODIN *ET ALII* 2000). Da subito società e enti di ricerca hanno focalizzato la loro attenzione sugli sviluppi potenziali di questa tecnica di rilievo: il *Visual Computing Research Laboratory* dell'Istituto di Scienza e Tecnologie per l'Informazione "Alessandro Faedo" (ISTI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche ha collaborato, sia con il *Digital Michelangelo project* (1999-2000) che con il *Minerva project* (2000-2003), in collaborazione con il *Restoration Laboratory della Tuscany Archaeological Authority* e il *National Institute of Applied Optics Cultural Heritage Group* (INOA) di Firenze (LEVOY *ET ALII* 2000). Il Centro D.I.A.P.RE.M. (Centro Dipartimentale per lo Sviluppo di Procedure Automatiche Integrate per il Restauro di Monumenti) dell'Università degli Studi di Ferrara ha rivolto la sua attività di ricerca ai modelli digitali informatici avanzati; il NubLab (affidente allo stesso D.I.A.P.RE.M.) è stato il primo laboratorio a possedere un laser scanner e a sperimentarne le potenzialità (MELI *ET ALII* 2004). Tra i privati, attivi già nel primo quinquennio degli anni Duemila, si ricordano la SAT Survey S.r.l. di Venezia, impegnata nell'ambito del rilievo 3D, della grafica e della diagnostica per l'architettura e la Topotek di Brescia, in qualità di Centro di Competenza nell'ambito delle tecniche del rilevamento e della geomatica²⁹. Importanti le sperimentazioni che si svolgono ininterrottamente da oltre un decennio presso il LIAAM (Laboratorio di Informatica Applicata all'Archeologia Medievale) dell'Università di Siena, con rilievo tridimensionale di reperti e di siti archeologici, associando il dato laser scanner all'elaborazione del GIS *intra-site* (PERIPIMENO 2009; PERIPIMENO-SALVADORI 2003A); il Laboratorio di

²⁹ Attivato dal Consorzio Inn. Tec., in collaborazione col Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Brescia come punto di incontro tra il mondo della ricerca e il tessuto industriale e produttivo, un osservatorio permanente multisetoriale per problematiche tecnico-scientifiche.

archeologia dei paesaggi e telerilevamento (LAP&T) dell'Università di Siena 1240, Dipartimento di Scienze Storiche e dei Beni Culturali, che nasce nel 2003 con l'obiettivo di collimare le ricerche e le metodologie di indagine basate sulle nuove tecniche di documentazione e informatizzazione in archeologia (CAMPANA-FRANCOVICH 2005, 2006). Tra gli studi e i progetti di ricerca più interessanti vale la pena ricordarne alcuni: Andreozzi L. già nel 2003, molto prima della diffusione su larga scala delle tecniche di fotogrammetria digitale, pubblica uno studio in cui analizza sia le tecniche di rilievo 3D laser scanner che quelle di *visual computing* (ANDREOZZI 2003); il gruppo di lavoro da lui coordinato affronta il complicato rilievo con 3d scanner Leica Cyrax 2.500 delle terme dell'Indirizzo a Catania, che evidenzia in maniera esaustiva capacità, limiti e problematiche dell'utilizzo di strumenti "statici" (il modello utilizzato non ruota infatti su se stesso e richiede un gran numero di scansioni negli ambienti chiusi o coperti) in edifici complessi (GIUFFRIDA *ET ALII* 2007); si inizia a sperimentare l'applicazione anche in ambiti particolarmente complessi, come i ripari sotto roccia (GIRARDI *ET ALII* 2007); dalla sperimentazione del rilievo 3D per la documentazione di architetture complesse su scala macro, si passa in poco tempo alle sperimentazioni *intra-site*, con i primi tentativi di documentare con le nuvole di punti singole stratigrafie archeologiche (PERIPIMENO-SALZOTTI 2006); il rilievo digitale dell'arte rupestre descritto da Christopher Chippindale, Frederick Baker e Alberto Marretta (CHIPPINDALE *ET ALII* 2012); la descrizione del rilievo 3D laser scanner applicato all'archeologia di Daniela Peloso (PELOSO-GABRIELLI 2004); la cattedra di Topografia e Cartografia dell'Università di Brescia e la Spin Off universitaria dell'ateneo (la Gexcel) hanno curato la collana Topografia e Geomatica, con la pubblicazione dei dati relativi alle attività di due anni di ricerca.

Il successo dei 3d scanner terrestri per il rilievo dei siti archeologici nelle indagini su scala macro e *intra-site* è stato solo in parte replicato nel disegno dei reperti. Gli strumenti più adatti a questo genere di acquisizione sono i 3D scanner di tipo ottico. Nel 2003 il LIAAM ha iniziato la sperimentazione del VI-900 della Konica Minolta per l'esecuzione di rilievi di dettagli architettonici, di affreschi e di reperti (Fig. 23).



Fig. 23 - Rilievo di una scultura con 3D scanner a luce Strutturata Konica Minolta Vivid 900i (fonte: xts.uchicago.edu).

Il lavoro svolto ha portato all'individuazione di due percorsi di sfruttamento del dato: la realtà virtuale per l'elaborazione di prodotti multimediali e la restituzione di dettagli e profili dei reperti ceramici, finalizzata alla divulgazione di carattere strettamente scientifico. Questa tipologia di scanner 3D, di tipo ottico e ad altissima precisione, acquisisce informazioni grazie ad un fascio laser e ad un sistema di camere CCD, con una fusione di altissima qualità tra nuvola di punti, *mesh* e immagine (SALVADORI 2003). Il collegamento di questi strumenti con PC dotati di software per l'*editing* delle scansioni e periferiche automatizzate come i piatti rotanti ha permesso di ottenere scansioni e modelli completi di altissima precisione. Già in questa fase della sperimentazione sono emerse le prime problematiche nel rilievo dei reperti ceramici: nelle forme chiuse e ben conservate non era possibile rilevare in maniera esaustiva l'interno, poiché il laser non riusciva a raggiungere l'intera superficie del vaso; nelle forme aperte, invece, l'immagine associata risultava spesso non perfettamente allineata. Questo ha reso necessari, a seguito dell'esportazione dei dati in altri

formati (.obj, .dxf, .ascii, .stl, .binary), interventi di modellazione 3D, *editing* e fotoritocco delle mappature con l'utilizzo di software terzi. Il dato originale, sotto forma di modello triangolato, è stato molto utile per lo studio dei profili su software CAD. Le immagini ottenute sono state invece utilizzate per elaborare foto-raddrizzamenti delle superfici decorate (PERIPIMENO-SALVADORI 2003B). Anche il DITAG (Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie) del Politecnico di Torino, nell'ambito della valorizzazione artistico-culturale dei beni archeologici, è stato uno dei primi laboratori a sperimentare il rilievo tridimensionale dei reperti con 3D scanner, con l'obiettivo di fornire, oltre a dati metrici e cromatici, informazioni utili per la classificazione. Lo studio ha portato ancora una volta ad ottenere risultati soddisfacenti con gli scanner triangolatori, che in questa fase della ricerca sono risultati i più adatti (BORNAZ *ET ALII* 2005). L'unità operativa dell'Università di Roma Tor Vergata, nell'ambito del progetto PRIN "Archiviazione e restauro di reperti archeologici mediante tecniche CAD-RP", ha svolto un'altra interessante indagine per lo sviluppo di un metodo che permettesse di archiviare e ricostruire le forme dei reperti archeologici con finalità di catalogazione, dopo aver eseguito una approfondita ricerca sugli strumenti da utilizzare (VALENTINI *ET ALII* 2004).

Nell'ultimo decennio, con l'introduzione delle tecniche fotogrammetriche accessibili a basso costo, l'utilizzo del laser scanner terrestre in archeologia è stato ridimensionato e, a causa dei costi più elevati della strumentazione, ridotto a casi particolarmente complessi o a rilievi di edifici monumentali (CIANCI-COLACECI 2022; MARTORELLA 2022). I lavori di studio e ricerca si sono concentrati soprattutto sul confronto tra le diverse tecnologie a disposizione e sulle potenzialità dei software *open source* e commerciali nella gestione del dato, come lo studio delle architetture storiche e medievali, incentrato soprattutto sul monitoraggio e la conservazione (BOSCO-D'ANDREA 2019; D'ANDREA-BARBARINO 2012; D'ANDREA *ET ALII* 2020; FUSCO *ET ALII* 2017), i rilievi delle architetture precolombiane, anche in corso di scavo (MERLO *ET ALII* 2015), e la documentazione degli ipogei funerari preistorici (MARCIALIS 2015; Fig. 24).



Fig. 24 - Rilievo con 3D laser scanner a differenza di fase all'interno di un ipogeo funerario.

Da un'analisi dei casi di studio emerge che i primi utilizzatori di questa nuova tecnica di rilievo dovettero fare i conti con una serie di problematiche, oggi in parte superate: l'elevato costo della strumentazione necessaria alle attività di rilievo; la necessità di *personal computers* altamente performanti e di software in grado di gestire la grande quantità di dati, acquisiti sotto forma di nuvole di punti; una strumentazione fragile e ingombrante, spesso non adatta ad essere trasportata in campagna o in luoghi impervi (i primi modelli di 3d laser scanner avevano un peso che poteva arrivare a 15 kg, in aggiunta al treppiede topografico, al notebook da collegare in rete, a un generatore di corrente o in alternativa a pesanti batterie che potessero garantire un'intera giornata di lavoro); alcune macchine necessitavano di stazioni di presa di lunga durata, cosicché un rilievo complesso poteva richiedere più giorni di lavoro sul campo. Un'analisi dei lavori pubblicati nell'ultimo quarto di secolo permette di comprendere la straordinaria evoluzione che gli strumenti, le tecniche e i software di gestione hanno avuto grazie alla ricerca.

La fotogrammetria digitale

L'introduzione delle tecniche di rilievo basate sulla fotogrammetria digitale è piuttosto recente (le stesse fotocamere digitali hanno sostituito quelle analogiche

utilizzate per la documentazione fotografica da non più di un quarto di secolo), con una vera e propria diffusione capillare nel mondo dell'archeologia avvenuta soltanto nell'ultimo decennio, grazie alla nascita di tecniche di rilievo a basso costo come la *Structure from Motion* (SfM). Ciononostante, la bibliografia di riferimento, in gran parte reperibile sulla rete, è piuttosto vasta.

È nel 2013 che grazie al costo contenuto dei software e dell'attrezzatura necessaria gli archeologi rilevatori iniziano ad utilizzare e a diffondere casi di studio che riguardano la *Structure from motion*, spesso con l'utilizzo di versioni demo³⁰, libere e *open source*³¹ dei software. Il più utilizzato e studiato diventa da subito Agisoft Photoscan, soprattutto perché non necessita di strumentazione specifica, ma può trasformare i dati acquisiti con qualsiasi tipo di camera: compatte, smartphone, tablet, reflex, mirrorless e droni (DIARA 2013); la sua elasticità ne diventa la chiave del successo. La scarsa diffusione dei droni e il complesso utilizzo degli aeromobili ad ala fissa porta ad una preferenza di questa tecnica per il rilievo terrestre di dettagli architettonici (VELLI-VELLI 2017; VERSACI-CARDACI 2013). Alcuni dei primi esperimenti svolti su singoli reperti studiano l'utilizzo del software distribuito da Autodesk 123D Catch³² (D'AMELIO ET ALII 2013). Con il passare degli anni e il diffondersi di Agisoft Photoscan e dei droni, che hanno costi accessibili e sono semplici da pilotare, aumenta il numero di pubblicazioni e la qualità delle stesse, con interessanti lavori incentrati su un reale confronto delle varie tecniche di rilievo 3D (BUA 2016; GIGLIO-BOSCO ET ALII 2022; MARCIALIS 2015), spesso finalizzate alla valorizzazione dei Beni Culturali (BARRILE ET ALII 2015). Risultano interessanti e produttivi gli studi che utilizzano software di filtraggio dei dati, come Adobe Photoshop, per migliorare le immagini preventivamente all'elaborazione SfM, che permettono di ottenere straordinari risultati nella

³⁰ Agisoft Photoscan ha diffuso fin dalla sua nascita tre diverse versioni del software: una demo completamente gratuita, una semi-professionale (che non permetteva di esportare i dati rielaborati), una professionale. Altri software consentono l'utilizzo gratuito fino ad un numero limitato di immagini da elaborare.

³¹ Meshroom Alice Vision, Mic Mac, Open Drone Map, Regard3D.

³² Software ritirato dal mercato, reso disponibile gratuitamente da Autodesk per un periodo limitato di tempo, le cui funzionalità sono poi confluite nel software ReCap Pro.

qualità dell'immagine (FIORILLO *ET ALII* 2016). La fotografia dall'alto permette anche l'elaborazione di modelli digitali del terreno, DEM (Fig. 25), per lo studio della stratigrafia e di porzioni di territorio interessate da ricognizione archeologica (ZONI 2017). L'indagine archeologica d'emergenza, che richiede tempi di esecuzione ed elaborazione speditivi, contribuisce al successo del metodo (FORTUNATI *ET ALII* 2018), che trova applicazione negli ambiti più svariati: rilievo in grotta (FIORINI *ET ALII* 2021), in aree funerarie a cielo aperto (BOSCHI 2022), nell'analisi dei reperti ossei (FICARRA 2022; RUBERTI 2022). L'ultima frontiera di indagine è rappresentata dall'utilizzo della fotogrammetria sferica, soprattutto per il rilievo di interni (BARAZZETTI 2022; DI FILIPPO 2023; FURFARO 2022) e dall'indagine multispettrale del dato (COLLAZO-LOPEZ 2023; ES SEBAR *ET ALII* 2023).

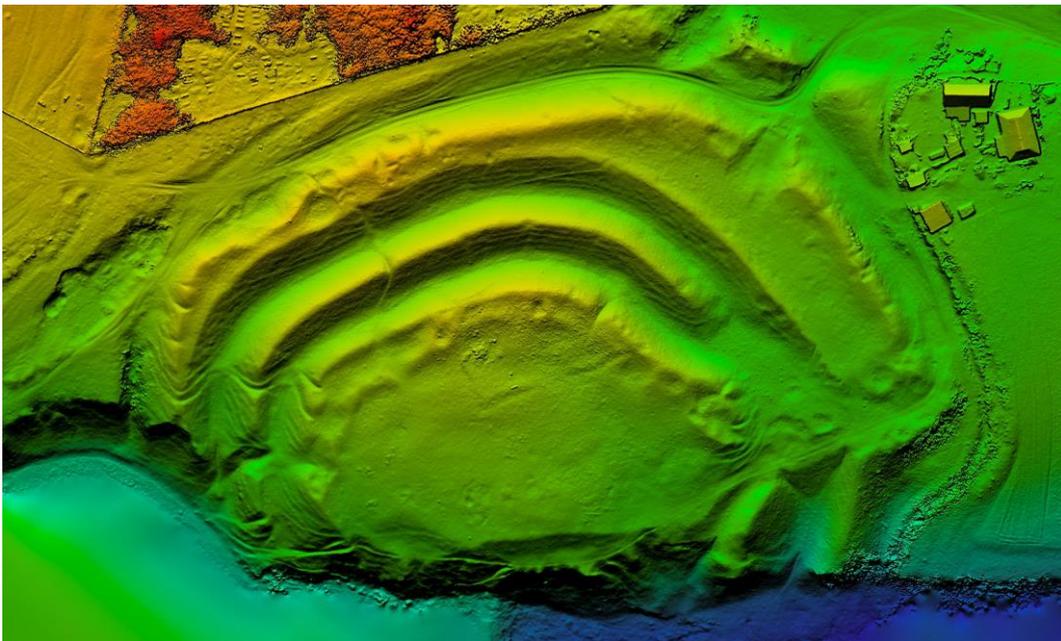


Fig. 25 - DEM (digital elevation model) realizzato con aerofotogrammetria digitale per lo studio di un'area archeologica (fonte: Panchuk Valentyn).

Nonostante il metodo ZScan/ZScan Micro (che ha avuto vari canali di evoluzione) abbia avuto una diffusione limitata rispetto al metodo SfM, soprattutto a causa dei costi decisamente più elevati, non mancano importanti lavori di sperimentazione. Dal rilievo dei fossili (FABRIS *ET ALII* 2008) e dei reperti archeologici (Lo BRUTTO-SPERA 2010), fino a lavori di carattere generale

(CECCARONI *ET ALII* 2011) o di confronto con altre tecnologie (MARCIALIS 2015, Fig. 24).

Resumen Capítulo 4: Historia de los estudios

El levantamiento arqueológico es un paso esencial para comprender y reconstruir todas las operaciones de excavación arqueológica y restauración, tanto cuando se trata de objetos individuales como de yacimientos arqueológicos extensos o porciones de territorio. El creciente uso de herramientas informáticas ha transformado la forma en que la Arqueología aborda la documentación y el análisis de datos. En el pasado, la documentación fotográfica y topográfica era tarea de técnicos especializados, pero en las últimas décadas ha surgido la figura del arqueólogo “levantador”, dedicado al estudio de las herramientas y técnicas de documentación arqueológica. La introducción de herramientas como las estaciones totales y el GPS ha mejorado la precisión y la velocidad del levantamiento, especialmente en los sitios arqueológicos. Además, la llegada de software CAD y SIG ha simplificado el proceso de documentación y devolución de datos. Sin embargo, la adopción de nuevas tecnologías ha obligado a los arqueólogos a adquirir habilidades técnicas adicionales. La continua evolución tecnológica presenta retos y oportunidades para los arqueólogos, que deben adaptarse rápidamente a las nuevas técnicas y herramientas. En el capítulo se describe la evolución y la importancia de la fotografía aérea en la investigación arqueológica. Desde los primeros experimentos con globos aerostáticos en el siglo XIX, hasta el pionero italiano Giacomo Boni, quien documentó las excavaciones en el Foro Romano entre 1899 y 1906, hasta el uso de la fotografía aérea para fines bélicos durante la Primera Guerra Mundial. Posteriormente, el arqueólogo O.G.S. Crawford aplicó sistemáticamente la fotografía aérea a la investigación arqueológica, identificando numerosos asentamientos incluso en áreas densamente pobladas. En Italia, Giuseppe Lugli y Ferdinando Castagnoli llevaron el uso de la fotografía aérea a ser una herramienta de estudio e investigación, introduciendo técnicas avanzadas de fotointerpretación. Sin embargo, el uso de la fotografía aérea se mantuvo limitado debido a los altos costos y las restricciones legislativas hasta las décadas de los ochenta y noventa. En las últimas décadas, con la llegada de los drones, la fotografía aérea ha experimentado una revolución, convirtiéndose en una herramienta accesible y versátil para la documentación arqueológica. Los drones permiten tomas fotográficas detalladas y precisas, integrando las modernas técnicas

de fotogrametría digital. Esto ha llevado a una difusión generalizada de la técnica de documentación aérea y del levantamiento basado en imágenes digitales, con aplicaciones en diversos sectores además de la arqueología, como el análisis ambiental, la agricultura y la cartografía. El uso de drones ha generado una amplia producción de estudios arqueológicos basados en estas tecnologías, con numerosas publicaciones en revistas especializadas y conferencias internacionales. La fotografía aérea, tanto tradicional como con drones, sigue siendo una herramienta fundamental para la investigación y documentación arqueológica, contribuyendo al descubrimiento y conservación del Patrimonio histórico y cultural. El texto describe, además, la evolución y aplicación de las técnicas de levantamiento tridimensional en arqueología, centrándose principalmente en dos enfoques: el levantamiento con escáneres láser 3D terrestres y la fotogrametría digital. Estas herramientas proporcionan información métrica importante que puede georreferenciarse, contribuyendo a la protección y valorización del Patrimonio Cultural. Numerosos organismos de investigación y laboratorios universitarios han experimentado y utilizado esta técnica para el levantamiento de artefactos y yacimientos arqueológicos. El uso de la fotogrametría digital en arqueología se ha extendido solo en los últimos años, gracias a la disponibilidad de software y equipos de bajo coste. Structure From Motion (SfM) es una de las técnicas más utilizadas, especialmente con software como Agisoft Photoscan. Se pueden utilizar cámaras digitales de diversos tipos para adquirir datos, incluido el uso de drones para el levantamiento terrestre. Ambas técnicas han experimentado una evolución significativa, con la introducción de nuevos software y mejoras de hardware. Sin embargo, todavía existen problemas no resueltos, como el alto coste de algunas herramientas y la complejidad del equipo necesario. A pesar de ello, el uso combinado de escáneres láser 3D y fotogrametría digital ha demostrado ser extremadamente útil en el ámbito arqueológico, permitiendo un análisis detallado y una documentación precisa de los yacimientos y artefactos.

5. Inquadramento cronologico e culturale dei contesti analizzati

5.1. L'Eneolitico in Sardegna

Le culture sviluppatasi in Sardegna nella prima età dei metalli, a partire dalle fasi finali del IV millennio a.C. e per tutto il III millennio a.C. (Fig. 27) mostrano analogie e continuità con la precedente fase del Neolitico Recente, detta San Michele di Ozieri, il cui arco cronologico occupa tutto il IV millennio a.C. (ATZENI 1962A; CONTU 1997; SANTONI 1989). Questa cultura ha rappresentato per la preistoria sarda quello che le varie culture dell'età dei nuraghi hanno rappresentato per la protostoria: nella sua durata millenaria si assiste, infatti, a straordinarie manifestazioni tecnologiche e artistiche (Fig. 26), ben visibili nella cultura materiale, a un importante sviluppo delle architetture negli insediamenti e nei luoghi di culto, ad un ipogeismo funerario unico nel suo genere e, per la prima volta, ad una vasta uniformità sociale, culturale ed economica delle popolazioni dell'isola. Queste caratteristiche della cultura di Ozieri hanno lasciato un segno molto forte in tutte le culture sviluppatasi successivamente nelle forme ceramiche, nelle manifestazioni artistiche e culturali, nell'occupazione degli insediamenti. Si tratta delle culture dette Sub-Ozieri (o Ozieri II), Filigosa, Abealzu e Monte Claro (MELIS 2000). Questo è dovuto anche alle particolari condizioni che nella Preistoria, e non solo, si vanno a delineare nei contesti di tipo insulare, in cui le *facies* culturali hanno degli ambiti di sviluppo molto precisi e limitati, che consentono importanti differenziazioni locali (soprattutto in una grande isola come la Sardegna) e che hanno, al contempo, un substrato comune. Questo fa sì che in alcune aree del Mediterraneo vi sia una cesura netta tra Neolitico ed Eneolitico mentre in altre aree, come appunto la Sardegna, vi sia invece un passaggio di tipo graduale (MELIS 2018).



Fig. 26 - Pisside proveniente dalla grotta San Michele di Ozieri (fonte: MORAVETTI 2017).

Fino agli anni Ottanta del secolo scorso il quadro cronologico e culturale dell'Eneolitico sardo risultava ancora incerto, sia per durata che per attribuzione delle *facies* o culture; ancora nel 1982 il Santoni attribuiva la cultura di Ozieri all'Eneolitico e la cultura di San Ciriaco al Neolitico Superiore (SANTONI 1982), mentre poco tempo dopo sia il Lilliu che il Contu, grazie alle analisi radiocarboniche e ai sempre più frequenti confronti extra-insulari, inquadrarono l'Ozieri nel Neolitico Recente (CONTU 1997; LILLIU 1988). Un quadro decisamente più chiaro emerse soprattutto grazie ai numerosi scavi condotti negli insediamenti di Su Coddu-Selargius e Terramaini-Pirri (USAI 1987). Questi permisero di isolare definitivamente la *facies* Sub-Ozieri, distinguendola dall'Ozieri classico soprattutto per la presenza di una decorazione meno evidente e spesso dipinta, ma con un corredo ceramico molto simile nelle forme (UGAS 1981; UGAS ET ALII 1985, 1989, 2012). Si trattava, quindi, di un momento di passaggio dal Neolitico all'Eneolitico, che si sarebbe poi sviluppato nella successiva *facies* di Filigosa, mostrando una grande continuità culturale e tecnologica. Un altro aspetto interessante dell'Eneolitico sardo è rappresentato proprio dal rapporto tra le *facies* di Filigosa e Abealzu, talvolta considerate come

aspetti regionali di un'unica cultura o come due culture diverse sviluppatesi da quella di Ozieri (ARCADU 2012). Le recenti indagini nei siti di Filigosa (Macomer), Abealzu (Oristano), San Giuseppe (Padria) e Monte d'Accoddi (Sassari) hanno evidenziato come vi sia uno sviluppo ininterrotto dall'Ozieri classico al Sub-Ozieri e da quest'ultimo a Filigosa e Abealzu (MELIS 2009, 2012, 2014; MELIS *ET ALII* 2012; MELIS-PIRAS 2012). La nascita dell'industria della metallurgia nell'isola sembra aver preso avvio grazie agli scambi commerciali con la Corsica e il continente, che vedono ancora come protagonista l'ossidiana; inizialmente il metallo non sostituisce l'industria litica ma riesce comunque a condizionare il sistema produttivo e di circolazione delle merci. La semplificazione dei motivi decorativi della ceramica rispetto all'Ozieri classico è dovuta soprattutto alla necessità di velocizzare, ridimensionare e diversificare la produzione, come si può notare anche dal notevole sviluppo avuto dalla materia dura animale. L'agricoltura e l'allevamento subiscono un incremento e si assiste allo sviluppo dei grandi villaggi tipici del Campidano nei pressi delle zone umide, come Su Coddu/Canelles a Selargius, San Gemigliano a Sestu, Terramaini a Pirri (MELIS 2018).

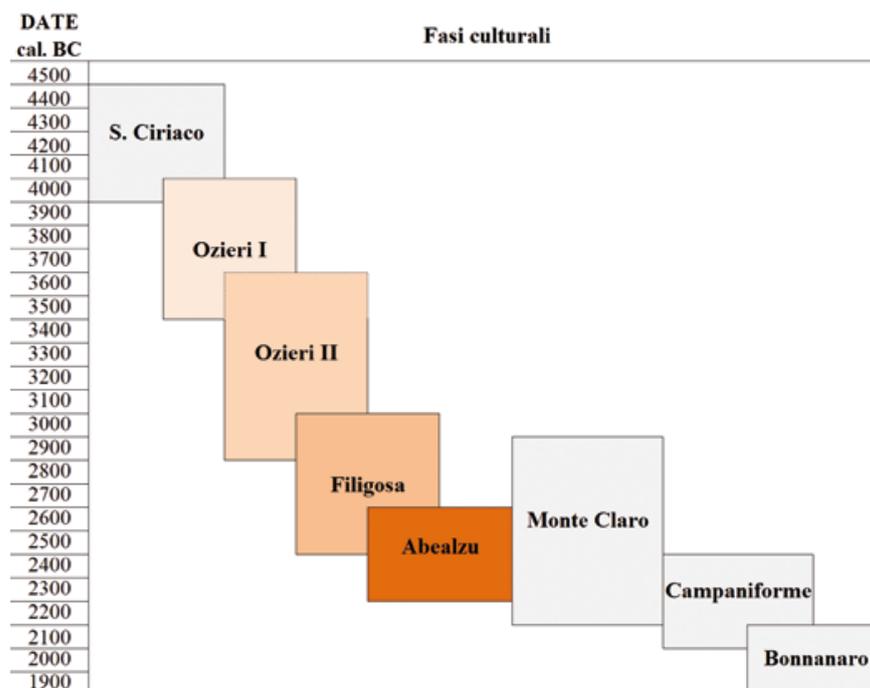


Fig. 27 - Le culture sarde tra IV e III millennio a.C. (fonte: MELIS 2017A).

5.1.1. La Facies Sub-Ozieri o Ozieri II

Il termine Sub-Ozieri fu utilizzato per la prima volta da Ugas G. nell'analizzare gli importanti risultati delle indagini archeologiche condotte negli anni Ottanta nei siti di Su Coddu-Selargius e Terramaini-Pirri, che permisero di fare finalmente chiarezza su questo particolare aspetto della preistoria sarda (UGAS *ET ALII* 1985, 1989; USAI 1987). Inizialmente vi fu un tentativo di individuare questa *facies* come l'aspetto abitativo del Filigosa, ma sia l'analisi dei materiali che le datazioni radiometriche hanno permesso di inserire la fase Sub-Ozieri nella linea evolutiva che dall'Ozieri classico porta al Filigosa e all'Abealzu (MELIS 2009, 2000, MELIS *ET ALII* 2007). Vi sono comunque delle importanti discrepanze cronologiche tra le datazioni di Monte d'Accoddi, comprese tra il 3900 e il 3400 a.C., probabilmente da attribuire all'Ozieri classico, e quelle di Su Coddu-Canelles, comprese tra il 3300 e il 2800 a.C., compatibili con quelle di Cannas di Sotto di Carbonia. La struttura 134 del lotto Badas di Su Coddu-Canelles potrebbe aver restituito la datazione Sub-Ozieri più alta (3640-3370), rafforzando la tesi del passaggio graduale all'Eneolitico (MELIS 2009). Nel Sub-Ozieri vi è un considerevole aumento dei materiali metallici (già presenti nella precedente fase Neolitica, in particolare con piccoli oggetti in rame e argento), provenienti prevalentemente da contesti abitativi: le prime tracce della lavorazione del metallo sono attestate a Su Coddu-Selargius (MANUNZA 2005) e a Terramaini-Pirri (USAI 2005). Gli utensili più presenti sono lesine e punteruoli, seguono i pugnali immanicati. Gli insediamenti continuano a svilupparsi nelle aree con forte vocazione agricola e nei pressi delle zone umide (corsi d'acqua e stagni), con capanne di forma ellittica o sub-circolare (presenti anche nell'Ozieri classico), con alzata e struttura in pali e frasche, talvolta con sotto-ambienti destinati a siloi o focolai. È documentato un incremento dell'utilizzo della terra cruda, come dimostrato dalla presenza di mattoni, intonaci e incannucciato (MANUNZA 2005; MELIS 2007; UGAS *ET ALII* 1985). Era praticata la caccia di cervo, prologo e cinghiale (UGAS *ET ALII* 1985), in associazione all'allevamento ovino, caprino, bovino, suino e all'attività di pesca, soprattutto dei molluschi. Le analisi sui pochi resti ossei rinvenuti nelle

sepulture con corredi attribuibili a questa fase, in particolare a Cannas di Sotto-Carbonia, evidenziano come vi sia una dieta con maggiore consumo di vegetali rispetto alla precedente fase Neolitica. Il Sub-Ozieri, a differenza di altre fasi Eneolitiche, è al momento maggiormente documentato nei contesti abitativi; nonostante siano attestate le sepolture ipogee, con rappresentazioni figurate a schemi corniformi rettilinei, non lo è la loro escavazione; le inumazioni possono essere singole (Perda Lada-Decimoputzu) (UGAS 1990) o collettive (Cannas di Sotto-Carbonia). Tra i contesti di carattere culturale si può far risalire a questa fase il secondo tempio di Monte d'Accoddi, che ingloba il precedente riprendendone la forma tronco-piramidale (MELIS 2009). La diffusione delle statuine fittili o litiche è documentata anche in contesti Sub-Ozieri (meno rispetto a Filigosa).



Fig. 28 - Tazza carenata riferibile al Sub-Ozieri (fonte: LEONELLI 2017).

5.1.2. La Facies Filigosa

La *facies* di Filigosa fu inizialmente associata a quella di Abealzu, tanto da spingere alcuni studiosi a ipotizzare la presenza di un'unica fase Filigosa-Abealzu, in cui la prima andava a rappresentare soprattutto l'elemento abitativo, la seconda l'elemento funerario; questa ipotesi sembra ormai definitivamente superata (MELIS 2009); sembra ormai appurato anche che si tratti di una naturale evoluzione delle culture di Ozieri e Sub-Ozieri, con l'abbandono dell'idea di uno sviluppo parallelo a quest'ultima fase, soprattutto grazie alle informazioni provenienti da recenti scavi. Essa deve il suo nome alla necropoli ipogeica di Filigosa, in agro di Macomer, un contesto di fondamentale importanza nella ricostruzione delle sequenze stratigrafiche della preistoria e protostoria sarda. Rispetto all'Ozieri classico si denota una discreta continuità nell'uso degli abitati già esistenti, così come nelle tipologie costruttive. I contesti territoriali di riferimento continuano quindi ad essere i medesimi. Rappresenta un elemento di novità l'emergere del carattere difensivo di alcuni insediamenti (San Giuseppe di Padria). Dai risultati delle analisi sui reperti scheletrici si nota, così come nella fase del Sub-Ozieri, un aumento del consumo della materia prima vegetale a discapito di quella animale, probabile indice, assieme alla maggiore età di macellazione dei bovini (forse utilizzati per il lavoro nei campi), di un'agricoltura più sviluppata e specializzata. Per quanto riguarda le datazioni, quelle provenienti dal contesto funerario di Scaba'e Arriu di Siddi (RAGUCCI-USAI 1999) indicano uno sviluppo nella prima metà del III millennio a.C., parzialmente in contemporanea con il Monte Claro, così come dimostrato dai confronti nella produzione artigianale (MELIS 2000). In questa fase si assiste definitivamente anche ad una presenza più cospicua dei manufatti metallici (armi, utensili, monili), soprattutto nella composizione dei corredi funerari, a dimostrazione di una nuova consapevolezza del valore della materia prima metallica. I pugnali diventano elemento simbolico sia nel corredo funerario che nelle rappresentazioni delle statue-menhir. In ambito culturale e funerario si assiste alla presenza del capovolto nelle statue-menhir, ai motivi a zig-zag nei pesi da telaio e ad una evoluzione delle statuine femminili a placca traforata,

come quelle provenienti da Monte d'Accoddi. Sono documentate le sepolture monosome e bisome (Laconi). Singolare il netto aumento della presenza di pesi da telaio sia in contesti culturali che funerari, a discapito di quelli abitativi (MELIS 2014B). Si riprende l'escavazione degli ipogei funerari, con la diffusione delle *domus de janas* a sviluppo longitudinale, che hanno forme e distribuzione degli ambienti distinte rispetto alla fase Neolitica: scompaiono numerose tipologie delle fasi precedenti, in particolare l'anticella sub-circolare, che va a fondersi in un unico ambiente con la cella principale, mentre lo schema planimetrico appare più sobrio e schematico, tipico dell'ordinata essenzialità che caratterizza le manifestazioni dell'età del Rame rispetto a quelle neolitiche. Il che è riscontrabile anche nella cultura materiale, in particolare nella produzione ceramica. È documentata la deposizione secondaria dei resti ossei combusti (FOSCHI NIEDDU 1986), così come il riutilizzo e la ristrutturazione degli ipogei più antichi (Sos Furrighesos-Anela, Santu Pedru-Alghero), l'utilizzo di anfratti (Monte Castru-Serrenti), grotte naturali (Sa Ucca de Su Tintirriolu-Mara; Fromosa-Villanovatulo), tombe a circolo (Serra Cannigas-Serrenti, Masone Perdu-Laconi).



Fig. 29 - Necropoli di Filigosa a Macomer (fonte: MELIS 2017C).

5.1.3. La Facies Abealzu

Questa *facies* prende il nome dall'omonima località, sita in una vasta area che si estende tra Sassari e Osilo e che comprende una necropoli ipogeica e un abitato riconducibile all'Eneolitico. Come accennato in precedenza, è stata per molto tempo considerata aspetto di un'unica *facies* con quella di Filigosa, in parte contemporanea. Esiste una sola datazione radiocarbonica, proveniente dal contesto gesturese di Mind'e Gureu; gran parte delle datazioni sono pertanto riconducibili alla sola cronologia relativa dei siti indagati e ai confronti derivati dalla cultura materiale (LAI 2009). Si conoscono pochi contesti abitativi, aspetto che potrebbe derivare da una riduzione della popolazione, riscontrabile nello stesso periodo anche in contesti extra-insulari. Uno di questi è l'abitato che si sviluppa nei pressi del santuario di Monte d'Accoddi, con capanne quadrangolari assimilabili a quelle contemporanee di cultura Monte Claro (MELIS 2009). Tra i contesti più importanti si ricordano: San Giuseppe (Padria); il santuario di Monte d'Accoddi (Sassari), in particolare la *capanna dello stregone*, la cui fase interamente riconducibile a questa cultura fu sigillata dall'incendio che la distrusse; Santa Caterina di Pittinuri; Santu Pedru (Alghero); le tombe di Masone Perdu e in particolare *l'allée couverte* di Corte Noa di Laconi, indagata da Atzeni E., che ha restituito ricchi corredi in cui i manufatti in metallo sono associati a oggetti in ossidiana di elevato livello tecnologico (ATZENI 1988; CICILLONI 2017); quelli di Abealzu (Sassari) e Sos Lachesos (Mores). Nei siti di San Giuseppe (Padria) e Monte d'Accoddi (Sassari) le due fasi appaiono distinte in stratigrafia; quelli di Abealzu (Sassari) e Sos Lachesos (Mores) presentano, invece, contesti misti. La differenziazione percepibile nella ceramica è meno evidente sia nelle architetture, siano esse civili o funerarie, che nell'ambito socioeconomico (BASOLI 1990; MELIS 2000). Questa *facies* rientra appieno nella graduale linea evolutiva che dalla disgregazione dell'Ozieri classico (Neolitico) porta al Sub-Ozieri (o Ozieri II) e al Filigosa, collocandosi prima e in contemporanea alla cultura di Monte Claro, rispetto alla quale assume dei caratteri decisamente più distintivi (MELIS 2000). In questa fase prosegue il processo tecnologico dell'industria ossea e di quella

metallurgica, che non sostituisce quella in pietra: sono documentati il rame, il piombo e l'argento; ciò a discapito dell'industria ceramica, in cui vanno a ridursi le decorazioni e le forme carenate, con una prevalenza dei vasi a fiasco. Anche in ambito culturale, così come nella tecnologia ceramica e nei contesti abitativi, si nota il passaggio graduale dal Neolitico all'Eneolitico: questo è evidente sia nelle statue-menhir, risultato del processo evolutivo che parte dai più antichi menhir aniconici e protoantropomorfi, che nei santuari, come quello di Monte d'Accoddi, in cui si concretizza per la prima volta una vera e propria distinzione tra l'area destinata al culto e quella destinata alla sepoltura.

5.1.4. La Cultura di Monte Claro

La cultura di Monte Claro prende il nome dall'omonimo colle cagliaritano, in cui agli inizi del secolo scorso il Taramelli recuperò da un ipogeo funerario il corredo riconducibile a questa fase oggi conservato nel museo archeologico del capoluogo. A breve distanza da quel contesto, in località Sa Duchessa, nel corso dei lavori per la realizzazione della Casa dello Studente, furono recuperati numerosi materiali che rimandavano a quella stessa tipologia (LILLIU-FERRARESE CERUTI 1960); nello stesso periodo, in varie località sarde, si assistette a ritrovamenti di oggetti e corredi simili: Su Fenosu di Palmas Arborea, Ruinalis de Segafenu di Nuraminis, Grotta Tanì di Carbonia, Monte Olladiri di Monastir, San Gemiliano di Sestu, la stessa grotta di San Bartolomeo a Cagliari (scavata nel secolo precedente dall'Orsoni); tutto portava a pensare all'individuazione di una nuova *facies*, inizialmente definita come nuragica arcaica (ATZENI 1962B, 1967; ATZORI 1960; MORAVETTI 2017). Essa si sviluppa nel corso del III millennio a.C., in contemporanea alle culture di Filigosa e Abealzu, ma su una linea evolutiva differente, che si discosta da quella che dall'Ozieri classico portò all'Eneolitico. La cultura materiale, la distribuzione, la tipologia degli insediamenti evidenziano una cesura netta con la tradizione locale, tanto a indurre a pensare alla presenza di gruppi di provenienza allogena, che entrarono subito in competizione con quelli indigeni (MELIS 2007). Da questo antagonismo derivava la nascita di un rapporto differente con il territorio, in cui la competitività per il controllo delle risorse portò alla fine di quello stile di vita aperto e condiviso a cui si assistette per molto tempo (ATZENI-SANTONI 1989). La cultura si diffuse rapidamente in tutta l'isola, lasciando a testimonianza della sua presenza una straordinaria cultura materiale, insediamenti, sepolture, architetture ciclopiche. Gli insediamenti non hanno uno schema fisso, ma si sviluppano soluzioni differenti: strutture con lo zoccolo in muratura (circolari, ellissoidali, sub-ellittiche, quadrangolari), grotte e ripari. Gli abitati sono talvolta associati a imponenti mura ciclopiche (Monte Baranta di Olmedo, Monte Osoni di Castelsardo) o a contesti culturali (Biriai di Oliena, Biru'e Concas di Sorgono) (CAMPUS-USAI 2011; CASTALDI 1999; MORAVETTI

2017). Uno degli insediamenti più interessanti ed estesi è quello di Monte Prun-Tratalia (Villaperuccio), emerso a seguito del ritiro delle acque dell'omonimo lago artificiale (MANUNZA *ET ALII* 2014). L'area è suddivisa in due grossi agglomerati, che occupano una superficie totale di circa tre ettari, e vanta un'occupazione ininterrotta nel tempo dall'Eneolitico al Medio Evo. Le abitazioni sono costituite da uno zoccolo in pietra di un unico filare e da un vespaio, sui quali andavano ad impostarsi le mura (in materiale deperibile) e un battuto argilloso; hanno forma trapezoidale, con una superficie media di 38 mq e sono suddivise in ambienti, con probabile cortile interno. Sono presenti anche strutture di forma quadrangolare, talvolta più piccole e con il lato corto absidato. In altre località della Sardegna sono presenti fondi di capanna o sacche, prive di basamenti perimetrali in pietra; tra queste anche a Corti Beccia di Sanluri, in cui sono state rinvenute e studiate quarantadue sacche: quelle strette e profonde furono interpretate come siloi per la conservazione di prodotti alimentari mentre un'altra, isolata e molto estesa, come stalla (UGAS 1982). Nel corso del Monte Claro si assiste alla nuova tendenza, diffusa peraltro anche nel resto del Mediterraneo, di costruire siti fortificati in altura: ne rappresentano uno straordinario esempio i villaggi fortificati di Monte Baranta di Olmedo, Monte Osoni di Castelsardo, Cuccurada di Mogoro (in cui l'abitato nuragico sembra insistere su un preesistente insediamento Monte Claro) e, forse, Sa Mandra Manna di Tula (ATZENI *ET ALII* 2001; BASOLI-DORO 2012; MORAVETTI 1979, 2000, 2004, 2017). Tale tendenza denota l'avvio di un periodo di epocali cambiamenti nella distribuzione degli abitati, nei traffici, nell'economia e nei rapporti geopolitici. Le caratteristiche abitative e costruttive, oltre alla documentata presenza di strati di frequentazione Monte Claro in numerosi siti dell'età del Bronzo, inducono a pensare che in questa cultura affondi le sue più profonde radici la civiltà nuragica. L'interposizione cronologica del Campaniforme e del Bonnannaro rappresenta un'interessante aspetto da indagare e approfondire (DEPALMAS-DEIANA 2011). Il rituale funerario dei gruppi Monte Claro sembra avere caratteri chiari e distinti soprattutto nel meridione dell'isola, in cui si hanno forme ben articolate e varie: in ipogei (molti dei quali più antichi, riconducibili a fasi Ozieri o Filigosa), in tombe a fossa, in

ciste litiche, in grotta. Diversa è la situazione nella Sardegna settentrionale, in cui non sono ancora state rinvenute sepolture esclusive di questa fase (MORAVETTI 2017). Sempre a Corti Beccia è documentata una sepoltura bisoma in capanna, con i defunti deposti in posizione fetale (UGAS 1982). Ancora nel Campidano, in un villaggio Monte Claro con capanne di varia forma in località Costa Facci a Bidda di Segariu, sotto una piccola struttura con forma a “U”, ricoperto da due lastre di scisto, è stato rinvenuto un defunto in posizione rannicchiata (documentato dallo scrivente, cds). È pertanto probabile che in quest’area il rituale non sia occasionale. Non è da escludere la sepoltura dolmenica, anche se non si hanno a disposizione datazioni radiocarboniche (CICILLONI 2017, 2009): frammenti di corredo riconducibili a questa fase dell’Eneolitico provengono dal dolmen di Motorra di Dorgali (LILLIU 1968) e dallo strato più antico indagato nel dolmen di Monte Acuto a Berchidda (BASOLI 1998). Per quanto riguarda i luoghi di culto e la religiosità non si hanno ancora informazioni dettagliate, ad esclusioni di alcuni monumenti di carattere megalitico (circoli di pietre, recinti, allineamenti) che sono stati indagati nei decenni passati e hanno restituito materiali riconducibili a questa cultura. Tra i siti indagati, il cui scavo ha restituito negli strati più antichi materiali Monte Claro, si ricordano: il circolo megalitico di Monte Baranta, inserito nell’omonimo villaggio fortificato di Olmedo (MORAVETTI 2000A, 2004); il circolo o “*cromlech* calendariale” di Sa Sedda de Biriai di Oliena (CASTALDI 1999); il circolo megalitico presente nei pressi della necropoli ipogeica di Sa Figu di Ittiri (MELIS 2001, 2004). Un’indagine in corso svolta dallo scrivente e da altri studiosi ha portato all’individuazione di numerosi monumenti della stessa tipologia, che non si possono associare con certezza a questa cultura in mancanza di indagini stratigrafiche. Le caratteristiche costruttive e formali, la presenza di elementi di carattere culturale, le scelte dei costruttori di prediligere aree di altopiano o collina con un’elevata visibilità sul territorio circostante (CICILLONI *ET ALII* 2018) e i confronti lasciano presagire che numerosi di questi monumenti siano comunque da associare a questo periodo della preistoria.



Fig. 30 - Una sepoltura riferibile al Monte Claro in località Gannì a Quartucciu (CA) in fase di scavo (fonte: MANUNZA 2013).

5.1.5. La Cultura del Vaso Campaniforme

La corrente culturale del Vaso Campaniforme che investì gran parte del continente europeo giunse in Sardegna in un momento molto avanzato dell'Eneolitico, inserendosi nei contesti Monte Claro, e perdurò fino all'età del Bronzo, mescolandosi con la *facies* di Bonnannaro. Furono soprattutto i risultati delle indagini svolte negli anni Ottanta e Novanta del secolo scorso a identificare il complesso quadro in cui questa cultura si è sviluppata in Sardegna, anche se molti tratti restano ancora da definire (ATZENI 1996A; FERRARESE CERUTI 1981A, 1981B, 1988, 1989; COCCHI GENICK 1996; CONTU 1996; LILLIU 1988, 1998A; MANUNZA 2005A; UGAS G. 1990, 1998A). I siti noti sono almeno una settantina, con una maggiore concentrazione nel Campidano, nel Sulcis-Iglesiente e nel sassarese. Come avviene anche nel resto del continente le fasi arcaiche del Campaniforme sono attestate soprattutto in ambito funerario. I rinvenimenti di ceramiche campaniformi in contesti abitativi Monte Claro sono molto rari: tra questi Monte Ossoni di Castelsardo, Monte Olladiri di Monastir e Palazzu di Samassi (MORAVETTI 2009). Nella capanna di Matzeddu di Monastir, riferibile al Bronzo Antico, la presenza di tripodi, collane in conchiglia e l'industria su osso rimandano a stretti contatti con l'orizzonte finale del Campaniforme. Diversa la situazione in ambito funerario, in cui la presenza di questa cultura, in linea con lo standard continentale, risulta più diffusa ed evidente in più parti dell'isola, anche se spesso i dati provengono da contesti sconvolti nelle fasi di riutilizzo delle sepolture. Queste sono state rinvenute in grotte, ripari, ipogei riutilizzati, dolmen e raramente nel tradizionale sepolcro campaniforme, la cista litica. A causa delle continue violazioni non sappiamo molto sul rituale funerario. Tra le grotte vi sono contesti di grande interesse (San Bartolomeo di Cagliari, Corongiu Acca di Villamassargia, Grotta della Volpe di Iglesias); nella necropoli ipogeica di Anghelu Ruju di Alghero un quarto delle *domus de janas* ha restituito materiali campaniformi, con una probabile delimitazione con muretti in pietra dell'area di deposizione del defunto con il suo corredo (DEMARTIS 1998). Simile la situazione nell'ipogeo di Marinaru di Sassari, con un anello di pietre che delimitava i defunti (CONTU 1998).

Importante l'ipogeo di Padru Jossu a Sanluri, in cui si rivengono due fasi campaniformi (A, con almeno 17 individui, e B) che si sovrappongono alla precedente fase Monte Claro dell'impianto originario (UGAS 1982). Un caso unico è rappresentato dalla tomba di Bingia'e Monti di Gonnostramatza, anch'essa risalente al Monte Claro nella sua prima fase di utilizzo, in cui si fondono ipogeismo e megalitismo, che ha restituito due distinti livelli di Campaniforme e Bonnannaro, in cui compare la tipica cista litica (ATZENI 1998). Stratigraficamente essa si sovrappone al Monte Claro, come a Pani Loriga di Santadi, a Padru Jossu di Sanluri, a Santu Pedru di Alghero. Per quanto riguarda i luoghi di culto non si hanno informazioni ad esclusione di alcuni frammenti fittili provenienti da Monte d'Accoddi di Sassari, troppo pochi per confermare una frequentazione stabile del sito. Tra le ceramiche si segnala presenza del tipico bicchiere, delle scodelle emisferiche, ciotole carenate e a profilo arrotondato, vasi tripodi e tetrapodi, con decorazioni a pettine o a incisione. In linea generale si possono individuare tre momenti: nel più antico si colgono gli influssi dell'Europa occidentale (Penisola Iberica e Francia), in quello intermedio dell'Europa centrale, mentre in quello più recente si coglie l'emergere dei caratteri indigeni della cultura di Bonnannaro (MORAVETTI 2009). La fase Eneolitica nell'isola si chiude con la presenza della cultura del Vaso Campaniforme, che perdurerà nell'età del Bronzo contribuendo alla formazione delle *facies* che ne saranno protagoniste.

5.1.6. Il contesto di Corti Beccia a Sanluri

La località Corti Beccia è sita a sud-ovest dell'abitato di Sanluri, nella regione storica del Campidano, la più estesa pianura dell'isola, in un'area a vocazione agricola nota alla bibliografia già prima della scoperta di questa sepoltura. Lo stagno di Stabazzus, oggi bonificato, rappresentava un'altra valida risorsa e contribuì al popolamento dell'area. Se la fase Eneolitica risulta ben documentata non si può dire altrettanto di quella Neolitica, di cui al momento non si hanno siti ben inquadrabili. Sono infatti ben rappresentate le *facies* di Abealzu, Monte Claro e del Vaso Campaniforme. Per l'Abealzu si hanno testimonianze nelle località Giliadiri e Bia Collinas, probabilmente ad uso abitativo, sempre a sud-ovest del centro urbano. Per il Monte Claro la tomba ipogeica di Padru Jossu (a questa fase risalirebbe l'impianto originario), Porcilis, Cucuru'e Poddinis (ipogeo a pozzetto all'interno del centro urbano) e un vasto abitato a Corti Beccia (UGAS 1982, 2017). Infatti, l'area in esame confina con un villaggio eneolitico in cui scavi diretti dalla Soprintendenza permisero di individuare quarantadue sacche, una serie di capanne infossate nel terreno con struttura lignea, una particolare struttura interpretata come stalla e una sepoltura bisoma in capanna.

Per il Campaniforme si menzionano Bidd'e Cresia e ancora Padru Jossu (UGAS 1981, 2017). Nel primo sito sono stati rinvenuti i probabili resti di una sepoltura collettiva; nel secondo l'importante sepoltura collettiva sopra descritta.

Il rinvenimento della sepoltura monumentale di Corti Beccia da parte della Soprintendenza Archeologica per le provincie di Cagliari e Oristano è avvenuto nel 2005, con struttura interrata e i resti osteologici erano appena visibili. Nei mesi di marzo e aprile 2010, con la direzione scientifica della dott.ssa Donatella Cocco e la direzione sul campo del dott. Antonio Francesco Vacca, è stata messa in luce una sepoltura monumentale collettiva, riferibile, che ha restituito un importante corredo funerario riferibile all'Abealzu: anelli in argento, vaghi di collana, industria litica, fusaiole e un corredo di vasetti miniaturistici, questi ultimi oggetto del presente studio. Nelle schede sono state inserite descrizioni, misure, dati del rilievo, fotografia del reperto e restituzione per nuvola di punti.



Fig. 31 - Sepoltura di Corti Beccia - Sanluri. Vista dall'alto.

I lavori in oggetto consistevano nello scavo della sepoltura, nella documentazione tridimensionale della stessa e nello smontaggio e rimontaggio finalizzato alla musealizzazione. La struttura ha una forma irregolarmente circolare, il cui ingresso è rivolto a sud, con una lunghezza di 3,50 metri e una larghezza di 2,80 metri. L'indagine ha permesso di individuare 19 unità stratigrafiche, sei delle quali contenevano i resti ossei (non in connessione a causa dei crolli) di un numero al momento indefinibile di individui (VACCA 2012). Il corredo funerario, composto dai caratteristici vasetti miniaturistici, da anelli e orecchini in metallo e da strumentario litico, trova stretti confronti con Serra Cannigas di Villagreca, Santa Caterina di Pittinuri a Cuglieri (COCCO-USAI 1988), Corte Noa e Masone Perdu di Laconi (ATZENI 1988).

5.1.7.I recinti e circoli megalitici della Sardegna

Il fenomeno dei recinti e circoli megalitici sardi si inserisce in quello più vasto del Megalitismo europeo di origine occidentale (GUILAINE 1996), che muove i primi passi lungo le coste atlantiche tra il VI e il V Millennio a.C. (GUILAINE 1998), e si diffonde gradualmente verso Oriente, seguendo spesso le coste e coinvolgendo le aree settentrionali e meridionali del Vecchio Continente, comprese le isole. La sua comparsa in Sardegna avviene probabilmente già con l'orizzonte culturale San Ciriaco, che si pone in una fase intermedia tra il Neolitico Medio di Cultura Bonu Ighinu e quello Recente di Cultura Ozieri (BOSCHIAN *ET ALII* 2000-2001). La letteratura specifica in Sardegna è indirizzata verso la tipologia dei circoli tombali galluresi e del Gerrei e, per un lungo lasso di tempo, i riferimenti a circoli e recinti "megalitici" si ritrovano sporadicamente all'interno di opere di ricognizioni e censimenti territoriali o come semplici segnalazioni. Solo in epoca recente i riferimenti a questi monumenti diventano più espliciti e approfonditi. Maxia e Fadda nel 1974 documentano la presenza di circoli di pietre in località Pispisu (Abbasanta) e Sa Codina'e s'Ispreddosu (Norbello) (MAXIA-FADDA 1974). Nel notiziario del 1975 della Rivista di Scienze preistoriche, compare il riferimento al circolo di Monte Dominigu di Uri; tre anni dopo (1978) è pubblicata una nota preliminare in seguito agli scavi eseguiti (TANDA 1978B). Segnalati alla Soprintendenza Archeologica nel 1976, i due circoli di Ortachis (Bolotana) sono stati rilevati e studiati da A. Moravetti nel 1998 (MORAVETTI 1998; TANDA 1978A). Lo stesso autore individua nel 1979 il circolo megalitico all'interno dell'area di Monte Baranta e pubblica la notizia nella Rivista di Scienze Preistoriche (MORAVETTI 1979). Lo studio del circolo sarà approfondito con uno scavo stratigrafico che interesserà tutta l'area, in cui sorgono costruzioni megalitiche e ciclopiche. Il recinto sacro ha restituito pochissimi materiali, di cultura Monte Claro; ha un diametro interno di m 9 x 12 ed è costituito da almeno 30 lastroni di piccola e media grandezza, con un varco di circa 4 metri che potrebbe far pensare ad un ingresso. Lo scavo ha messo in evidenza un piano roccioso levigato, per l'autore una sorta di "piccola piazza". Nel 1999 Editta Castaldi pubblica i dati delle attività di indagine svolte nel sito di Sa Sedda de Biriai (Oliena), descrivendo un *cromlech* calendariale presente nel vasto abitato d'altura di cultura Monte Claro. Il

“santuario” di forma semicircolare è associato alla presenza di menhir. Si tratta di un circolo megalitico di cui residuano 11 pietre fitte, mancante dei megaliti della zona ovest che, secondo i calcoli dell'autrice, doveva avere circa 31 metri di diametro e serviva a configurare un calendario (CASTALDI 1999). A partire dal 2001 sono stati pubblicati diversi dati sul circolo di Sa Figu (Ittiri) in rapporto alla necropoli ipogeica omonima. I risultati dell'indagine stratigrafica, eseguita nel 2003, vengono pubblicati l'anno successivo. Anche in questo caso le prime fasi di utilizzo dell'area sembrano riconducibili alla cultura di Monte Claro (MELIS 2004). Nello stesso 2004, in occasione di una mostra presso il museo archeologico di Cagliari, sono presentati i dati preliminari degli scavi portati avanti nell'area di Cirquittus (Laceni). Il circolo megalitico (diametro 20 x 30 m circa) si trova al centro del pianoro di Cirquittus-Mandareddu, in un'area che ha restituito materiali d'industria litica e ceramica Filigosa e Abealzu. Nei pressi del monumento è stata indagata una struttura sub-rettangolare (metri 9 x 7.50 circa) che ha restituito anche materiali di cultura Ozieri (ATZENI 2004; CICILLONI 2013). Lo stesso circolo megalitico viene descritto come *cromlech* calendariale da Edoardo Proverbio e Pino Calledda: gli autori lo fanno risalire all'Eneolitico sardo, inserendolo nel complesso scenario del megalitismo del Sarcidano (PROVERBIO-CALLEDDA 2000). Nel 2007 A. Depalmas e S. Bagella presentano uno studio territoriale sardo-corso, analizzando la distribuzione e le caratteristiche dei circoli in rapporto alle sepolture dolmeniche nelle due aree (DEPALMAS-BAGELLA 2007). Manunza e Forci nel 2008 segnalano la presenza di circoli megalitici, probabilmente ad uso funerario, ancora nel Gerrei (Silius) e a Siurgus Donigala (MANUNZA 2008; FORCI 2008). Nell'ultimo decennio, ad opera dello scrivente e della collega Maria Giovanna de Martini, sono stati presentati dei lavori che riassumono i risultati di ricerca di due tesi di laurea sui recinti e circoli megalitici dell'isola (MARCIALIS-DE MARTINI 2024A, 2024B).

5.2. Le età del Bronzo Recente, del Bronzo Finale e del Ferro in Sardegna. Inquadramento culturale e cronologico.

5.2.1. Inquadramento generale

Età del Bronzo Recente

Intorno alla metà XIV secolo a.C. si assiste in tutta l'isola al passaggio dall'età del Bronzo Medio all'età del Bronzo Recente, che avrà uno sviluppo di circa due secoli, tra il 1.350 e il 1.150 a.C. circa (CONTU *ET ALII* 2004; LO SCHIAVO *ET ALII* 2004; UGAS *ET ALII* 2004). Tra le due fasi è possibile individuare nel repertorio della cultura materiale una certa continuità, con caratteri distintivi tra la Sardegna Settentrionale e quella meridionale (DEPALMAS 2009A). Questi caratteri spinsero Ugas a distinguere due aspetti di questa fase: il Bronzo Recente 1 di Muru Mannu, caratterizzato dalla ceramica “nera-lustrata”, in realtà già presente nel Bronzo Medio, che non rappresenta perciò caratteri di innovazione; il Bronzo Recente 2, con la ceramica “grigio-ardesia” di Antigori-Sarroch nel meridione e la caratteristica “ceramica a pettine evoluta”, diffusa nella Sardegna centro-settentrionale (UGAS 1998B; UGAS *ET ALII* 2004). Un'altra distinzione è quella proposta da Leonelli, che sulla base dei risultati delle indagini condotte nel nuraghe Arrubiu di Orroli distingue un Bronzo Recente 1 comune a tutta l'isola e un Bronzo Recente 2 che si differenzia tra settentrione e meridione, soprattutto sulla base della distribuzione della ceramica a pettine e della “grigio-ardesia” di imitazione egea (CAMPUS-LEONELLI 2006A). Risulta comunque evidente e tangibile una continuità tra Bronzo Medio e Bronzo Recente, con la ceramica a pettine dell'area centro-settentrionale che si sviluppa sulle caratteristiche di quella del Bronzo Medio e quella grigio-ardesia del meridione, che presenta invece caratteri innovativi (DEPALMAS 2009A). Tali differenziazioni sembrano manifestarsi già nel Bronzo Recente 1: i contesti indagati non hanno infatti mostrato compresenza tra le due tipologie

(FERRARESE CERUTI *ET ALII* 1987). Resta comunque difficile individuare due facies differenti basandosi esclusivamente su un aspetto decorativo; l'avvaloramento di una tale ipotesi necessita, infatti, di essere rafforzata da altri elementi, non solo materiali (PERONI 1996); a tal proposito si sono avanzate ipotesi su una possibile differenziazione in alcuni caratteri architettonici dei nuraghi evoluti (DORE 2003; MELIS 2005). In questa fase si assiste ad un consolidamento dei contatti, degli scambi commerciali e anche del probabile trasferimento di maestranze nel il resto del Mediterraneo, in particolare con l'area egeo-cipriota, come hanno dimostrato le indagini del nuraghe Antigori di Sarroch e di Monte Zara a Monastir (FERRARESE CERUTI 1982, 1983, 1985; RELI 1994; UGAS 1992). Nel Bronzo Recente, e probabilmente anche nel Bronzo Finale, sono documentate anche le presenze nuragiche a Cannatello, nella Sicilia occidentale, e a Kommos, nell'isola di Creta (VANZETTI 2004; RUTTER 2006; WATROUS 1992); altro testimone degli stretti contatti con l'area egeo-minoica è il celebre *alabastron* rinvenuto nel nuraghe Arrubiu (LO SCHIAVO-SANGES 1994). La forma più diffusa in entrambe le macroaree resta il tegame, a cui si aggiungono i doli, i grandi contenitori destinati alla conservazione delle derrate alimentari, testimoni dell'intensivo sfruttamento delle risorse agricole e, probabilmente, dell'importante incremento demografico a cui si assiste in questa fase (LO SCHIAVO-SANGES 1994, PERRA 2016). Nella Sardegna centro-settentrionale, caratterizzata dalla presenza della ceramica a pettine in oltre 100 siti, risulta più complesso suddividere il Bronzo Recente in due fasi, poiché nella tecnologia ceramica non si percepiscono importanti innovazioni (DEPALMAS 2007). Nella Sardegna Meridionale è invece la presenza della ceramica "grigio-ardesia" o "grigia-nuragica" a consentire di differenziare le due fasi. I risultati delle indagini svolte nel nuraghe Arrubiu di Orroli e del nuraghe Adoni di Villanova Tulo sono in linea con quanto affermato (CAMPUS-LEONELLI 2006A, 2006B). Per quanto riguarda la metallurgia resta valido il quadro evidenziato da Lo Schiavo (LO SCHIAVO *ET ALII* 2004): sono ben rappresentate le asce a margini rialzati, un tipo di pugnale a lama piatta con immanicatura su due fori, scalpelli, punteruoli, fibule ad arco, spade votive in rame, forse riconducibili a momenti di fondazione degli edifici cultuali;

l'apporto egeo-cipriota e la circolazione di artigiani e tecnologie è ben evidente anche nella metallurgia (DEPALMAS 2009).

Età del Bronzo Finale

L'età del Bronzo Finale ha una durata di circa tre secoli, dal 1.150 al 850 a.C.; si tratta di quel momento della civiltà nuragica in cui tendenzialmente non vengono più edificati i nuraghi, semmai subiscono delle importanti opere di ristrutturazione e modifica (DEPALMAS 2009B). Tali modifiche e ristrutturazioni interessano anche la destinazione degli ambienti, che diventano abitazioni, magazzini o luoghi di culto, come nello straordinario caso del vano E del nuraghe Su Mulinu di Villanovafranca (UGAS 1990, 2015). Le strutture abitative si addossano spesso ai bastioni ciclopici e assumono forme planimetriche variegata. Proseguono ma si riducono notevolmente le importazioni micenee (FERRARESE CERUTI *ET ALII* 1987), mentre si intensificano quelle con la penisola iberica e la Sicilia, come dimostrano i materiali sardi rinvenuti all'Huelva (FUNDONI 2009), e quelli con le isole eolie (CAVALIER-DEPALMAS 2008). Il Bronzo Finale sembra essere un periodo di non grandi sconvolgimenti e la cultura materiale sembra riflettere questa caratteristica: nonostante si possano individuare una fase iniziale, una centrale e una finale per questo periodo, si hanno forme di lunga durata, che perdureranno anche nella successiva età del Ferro. Nel Bronzo Finale 1 si ha l'affermazione di nuove forme (CAMPUS-LEONELLI 2000), di una ceramica a pareti sottili (ATZORI 1987) e dell'ormai certa diffusione su larga scala dell'utilizzo del tornio (COSSU-PERRA 1998). Nel Bronzo Finale 2 si ha l'affermazione e il consolidamento delle forme e la comparsa di motivi decorativi che perdureranno nel tempo. Nel Bronzo Finale 3 si può invece individuare un momento di iniziale transizione all'età del Ferro, con caratteri che rimandano alla fase precedente e annunciano quella successiva (SEBIS 2008). Per quanto riguarda la metallurgia si conferma la linea di tendenza acquisita nel Bronzo Recente, con importazione di tecnologie, materiali e sicuramente anche maestranze dall'area cipriota. Si diffondono le asce di imitazione egeo-cipriota e si iniziano a diffondere quelle iberiche. Prosegue la diffusione di lingotti *ox-hide* e spade votive, oltre ad un importante strumentario

da lavoro artigianale e agricolo. Gli influssi egeo-ciprioti non furono da ostacolo alla formazione di caratteri originali derivanti anche dalla tradizione locale.

Età del Ferro

Si è dibattuto a lungo e si continua a dibattere sulle questioni terminologiche riguardanti l'attribuzione dell'età del Ferro (o almeno del Primo Ferro) alla civiltà nuragica, passando in rassegna definizioni come post-nuragica o nuragico finale (BERNARDINI 2007; CONTU 1997; LILLIU 1997; UGAS1998B). Se è ormai appurato che in questo periodo non vengono più edificati nuraghi ex-novo (gran parte dei nuraghi classici furono infatti edificato nel Bronzo Recente) e che questo edificio nelle fasi del Bronzo Finale perde la sua funzione di simbolo del potere politico e comunitario, è pur vero che esso resta comunque un elemento centrale per le *elite* che guidano i *clan* dell'età del Ferro. Le tracce di ristrutturazione dei monumenti, l'occupazione ininterrotta in alcuni siti, la destinazione d'uso culturale di alcuni ambienti mostra comunque un forte legame con la tradizione passata e tipicamente nuragica. Lo stesso nuraghe diventa testimone di una società arcaica ormai perduta, come dimostra la presenza dei modelli di nuraghe in pietra nelle cosiddette capanne delle riunioni, dei modelli in bronzo offerti come ex-voto nei templi come nelle necropoli e, in alcuni casi, la sua trasformazione in luogo di culto (UGAS 2009). Il passaggio dal Bronzo Finale alla fase geometrica del Primo Ferro avviene nel corso del IX secolo a.C. La data che convenzionalmente segna questo cambiamento è l'850 a.C., come noto dagli strati dall' Ausonio II del castello di Lipari, che hanno restituito materiali nuragici (BERNABÒ BREA-CAVALIER 1980; CONTU 1980; FERRARESE CERUTI 1987). L'Età del Ferro è suddivisa in tre periodi, la cui cronologia si basa su datazioni e confronti con l'egeo e con l'area etrusco-laziale: il Geometrico (900/850 – 725 a.C.); l'Orientalizzante (725 – 600 a.C.); l'Arcaico (600 – 510 a.C.). Questi sono a loro volta suddivisi in sottofasi. Nel Periodo Geometrico si hanno in un primo momento decorazioni con motivi a rilievo (barretta betilica, crescente lunare, disco, forcilla, pugnale a elsa gammata), forme tipiche come brocche a corpo globulare, scodelline, lucerne monolicni, bronzi figurati, lucerne in bronzo; in un secondo momento, detto appunto

Geometrico II, si ha una esplosione della decorazione geometrica su tutta la superficie; nei bronzi figurati inizia il momento di Abini II (UGAS 2009). Nel Periodo Orientalizzante continua, affievolendosi, l'esportazione dei materiali sardi; le produzioni locali subiscono l'influenza sia dell'Etruria che dei fenici presenti sulla costa, anche nella bronzistica (BARTOLONI 2003; BARTOLONI-BERNARDINI 2004; BERNARDINI 2007; LILLIU 1997). Si sa poco sia degli sviluppi dell'edilizia che delle aree funerarie, mentre continua la frequentazione dei luoghi di culto. Nella fase Arcaica si hanno ancora meno dati su aree abitative e i contesti funerari. Gli insediamenti diminuiscono e si ha una forte tendenza all'urbanizzazione. Continuano i contatti sia con l'Etruria che, naturalmente, con i fenici, ma sembra importante anche l'afflusso di materiali dalla Grecia, che nel mentre ha stabilito aree portuali anche nell'isola (D'ORIANO 2010; ZUCCA 2002). Nella seconda metà del VI secolo a.C. la pressione cartaginese e il controllo sui mari aumenta, limitando fortemente le possibilità di sviluppo dal carattere indigeno.

5.2.2.I nuraghi e gli insediamenti

I nuraghi e gli insediamenti nel bronzo Recente

Il Bronzo Recente è il momento della protostoria sarda in cui si assiste sicuramente ad una esplosione economica e demografica e, di conseguenza, delle architetture nuragiche. Il nuraghe è l'opera architettonica che più di tutte caratterizza questa civiltà, tanto che da esso prende il nome (LILLIU 1988; CONTU 1997). I "protonuraghi" o "nuraghi arcaici" (UGAS 2005), sono delle costruzioni ciclopiche di forma irregolare (sub-rettangolare, sub-ellissoidale, talvolta reniforme), caratterizzate da una enorme massa muraria a discapito degli spazi interni; hanno lunghi corridoi, talvolta a sezione tronco-ogivale, e nicchie e furono edificati prevalentemente nel Bronzo Medio. Nelle fasi avanzate di questo periodo l'ingegno, il miglioramento delle tecniche costruttive, la disponibilità di una grande quantità di forza lavoro e la presenza di maestranze specializzate permisero l'edificazione dei primi nuraghi classici, con la tipica forma tronco-conica e la camera a *tholos*, talvolta su più livelli (MELIS 2017B). Con il Bronzo Recente si assiste sia all'ampliamento dei nuraghi esistenti (classici o arcaici) che all'edificazione di nuovi nuraghi complessi, le cui planimetrie fanno pensare alla presenza di una progettualità a monte dell'opera (DEPALMAS 2009A; PITZALIS 2003). È in questo periodo che il paesaggio nuragico assume la forma e le dimensioni che hanno permesso a gran parte delle opere realizzate di giungere fino a noi, con una presenza capillare su tutto il territorio sardo.

La distribuzione degli insediamenti, che spesso ma non sempre si sviluppano attorno alla struttura simbolo di queste comunità, denota la tendenza, già piuttosto marcata nelle fasi precedenti, ad occupare in maniera intensiva le aree di altura o collinari a prevalentemente economia pastorale: ogni insediamento era parte di un sistema più vasto (CICILLONI-MIGALEDDU 2008). Il territorio appare come suddiviso in entità territoriali (CAMPUS 2008; CICILLONI *ET ALII* 2018; SPANEDDA 2006, 2011). Le strutture abitative hanno generalmente pianta circolare, ma ne sono state rinvenute anche di forma rettangolare o sub-

trapezoidale (SANTONI 1992), con basamento in pietra e copertura in materiale deperibile. Non mancano attestazioni di strutture costruite in mattoni crudi o malta di fango, soprattutto nel Campidano, come nei casi di Baccu Lau a Selargius, San Gemiliano di Sestu, Monte Zara di Monastir (FORCI-RELLI 1995; LUGLIÉ 2005; UGAS 1992). Inizia la frequentazione e forse l'edificazione dei luoghi di culto legati all'acqua, come dimostra la presenza di materiali riferibili a questa fase in contesti come Cuccuru is Arrius di Cabras, Cuccuru Nuraxi di Settimo San Pietro, Su Monte a Sorradile (ATZENI 1987; SANTONI-BACCO 2008; SEBIS 1987)

I nuraghi e gli insediamenti nel Bronzo Finale

Nel periodo del Bronzo Finale, si assiste a cambiamenti significativi di natura socioculturale ed economica, che influenzano profondamente il concetto stesso di nuraghe. In questa fase, sembra che il nuraghe perda la sua tradizionale funzione di punto di riferimento e simbolo centrale della società che rappresenta. Questa trasformazione non riguarda solo la sua funzione, ma si estende anche alla sua integrazione nel tessuto abitativo circostante. (DEPALMAS 2009B). Le abitazioni del periodo si organizzano in isolati con planimetrie variabili, caratterizzate da una maggiore complessità rispetto alle fasi precedenti. Le strutture abitative mostrano una disposizione di ambienti spesso di forma circolare, che si affacciano su una corte centrale. Ciò riflette un cambiamento nella concezione degli spazi abitativi, indicando forse una diversa organizzazione sociale e familiare rispetto alle fasi precedenti. Un fenomeno interessante è l'evoluzione dei villaggi che si sviluppano attorno ai nuraghi. In molti casi, i villaggi si adattano e si collegano direttamente al nuraghe, occupandone gli spazi interni e riutilizzando i materiali di crollo. Tale riutilizzo può essere interpretato come un segno di adattamento e ridefinizione degli spazi in base alle nuove esigenze della comunità. (ATZENI ET ALII 2001; COSSU-PERRA 1998). Le analisi palinologiche condotte nell'altopiano di Pranemuru e nelle zone circostanti forniscono ulteriori indicazioni sulle trasformazioni in atto durante il Bronzo Finale. Queste rivelano un aumento significativo dell'attività agricola, con particolare riferimento alla produzione di cereali. Al contempo, si

osserva una marcata deforestazione, presumibilmente causata da incendi. Questo cambiamento nell'uso del suolo può essere interpretato come una risposta alle esigenze crescenti della popolazione e alla richiesta di risorse agricole. (LOPEZ *ET ALII* 2005). Le indagini archeologiche hanno anche evidenziato la presenza di silos e grandi contenitori destinati alla conservazione di derrate alimentari. Questi elementi archeologici forniscono ulteriori prove a sostegno dell'ipotesi dell'intensificazione dell'attività agricola durante il periodo del Bronzo Finale. La costruzione di strutture specifiche per la conservazione dei prodotti agricoli indica una maggiore consapevolezza delle necessità di stoccaggio e un avanzamento nelle pratiche agricole (PERRA 2003). Il Bronzo Finale rappresenta un periodo di trasformazione significativa ma graduale nel contesto della civiltà nuragica, caratterizzato da cambiamenti socioculturali, economici e architettonici. Il nuraghe, tradizionalmente simbolo centrale della società, subisce una ridefinizione del suo ruolo, mentre le abitazioni si evolvono in complessità e le pratiche agricole mostrano un notevole sviluppo. Questi cambiamenti rivelano una società in grado di adattarsi alle nuove esigenze e alle sfide del tempo, segnando un capitolo importante nella storia della Sardegna protostorica. È in questa fase che assumono sempre maggiore importanza i luoghi di culto e di carattere comunitario, come templi a pozzo, strutture con sedili, templi a *megaron*. Attorno alle aree religiose si sviluppano abitati il cui utilizzo potrebbe essere legato a feste di carattere comunitario.

I nuraghi e gli insediamenti nell'età del Ferro

Si conferma la tendenza acquisita nel Bronzo Finale a ridurre gli interventi di ristrutturazione dei nuraghi. Sui bastioni, gli antemurali e i cortili delle torri ciclopiche vanno ad addossarsi le strutture dei villaggi, che oramai diventano il fulcro della vita politica, sociale ed economica (UGAS 2005). Le abitazioni sono composte da più ambienti, fino a otto, e organizzate attorno ad una corte centrale, come nei casi di Genna Maria a Villanovaforru, Sant'Imbenia di Alghero, Santa Vittoria di Serri (BADAS 1987; BAFICO 1987; TARAMELLI 1931). I vani degli ambienti non sono più quasi esclusivamente circolari, ma assumono forme ellittiche, talvolta irregolari, con muri rettilinei; gli ambienti hanno destinazioni

d'uso differenziate e spesso inglobano strutture più antiche (UGAS 2009). Si osservano le prime tracce di viabilità e i bronzi raffigurano mezzi di trasporto (TANDA 1986). All'interno dei villaggi si differenziano le aree destinate al culto, alla produzione artigianale, vi sono pozzi e complessi sistemi di canalizzazione delle acque: si tratta, oramai, di insediamenti dall'aspetto proto-urbano. Costante la presenza delle "sale del consiglio" o "capanne delle riunioni", ambienti circolari dotati di sedile e spesso di bacile o modello di nuraghe al centro, che erano sede del potere politico e giudiziario: uno degli esempi più noti è quello del Palmavera di Alghero (MORAVETTI 1977).

5.2.3. Le sepolture

Nel Bronzo Recente le pratiche funerarie delle società nuragiche appaiono invariate rispetto alla fase precedente; si hanno sia continuità di deposizione che di riutilizzo delle preesistenti tombe di giganti edificate nel Bronzo Medio. In queste non avvengono particolari modifiche (DEPALMAS 2009). Le sepolture costruite in questa fase seguono lo stile dell'epoca, con utilizzo della tecnica isodoma. Si diffondono le sepolture senza esedra (COCCO-USAI 1992; LAI 1992), che indicano un probabile cambiamento nel rituale funerario, forse con una modifica di quel rituale che prevedeva riti di legati al culto degli antenati (CAMARA-SPANEDDA 2014); aumentano gli oggetti di pregio nei corredi, come metalli, monili in vetro e ambra, vasi miniaturistici, oggetti in osso (CAMPUS-LEONELLI 2006B; MANUNZA 2008). Nel Bronzo Finale non sembra esserci corrispondenza tra le straordinarie manifestazioni architettoniche relativamente ai luoghi di culto e agli abitati e le sepolture. Continuano ad essere utilizzate le tombe di giganti, anche se non se ne conoscono costruite ex-novo, mentre sono documentate tombe a corridoio, semi-ipogee, e a pozzetto (UGAS 1993; UGAS-LUCIA 1987). Nell'età del Ferro si diffondono le necropoli con sepolture individuali: è il caso, ad esempio, della straordinaria necropoli e santuario di Monte Prama a Cabras (USAI 2018), di Antas a Fluminimaggiore (UGAS-LUCIA 1987), di Is Aruttas a Cabras (SANTONI 1977). Le sepolture sono realizzate a pozzetto, con il defunto depresso rannicchiato all'interno di esso, talvolta segnalato da un tumuletto di pietre, talvolta da una lastra e una scultura in pietra. Non mancano fosse individuali e tafoni (UGAS 2009).

5.2.4.I luoghi di culto nelle età del Bronzo e del Ferro: edifici templari e pozzi sacri.

I templi in antis e a “megaron”

Oltre ai più noti e diffusi pozzi sacri si diffusero in Sardegna, già a partire dal Bronzo Medio e fino all'età del Ferro avanzata, dei particolari edifici di culto, con un impianto planimetrico e un'architettura insolita se paragonata a quella dei nuraghi e delle strutture abitative: i templi a *megaron* o in *antis*. Sono degli edifici a pianta rettangolare, che devono il nome alle loro caratteristiche planimetriche e allo stretto confronto con i *megara* delle civiltà palaziali di ambito egeo. Il primo studioso a individuare e dare un nome a queste particolari architetture presenti all'interno del villaggio di Serra Orrios a Dorgali, che si distinguevano dalle altre per la presenza di muri rettilinei, fu Doro Levi nel 1936, nel corso delle prime esplorazioni del villaggio. Egli fu anche il primo ad associare a questi edifici funzioni di carattere culturale (LEVI 1937). Il megaron è un'architettura dall'impronta distintiva, che assume la forma di un edificio a pianta rettangolare, con i lati lunghi che si estendono in avanti (in *antis*), con murature rettilinee che delineano un atrio di ingresso agli spazi interni. La caratteristica peculiare di questa struttura diventa ancor più evidente nella sua variante doppiamente in *antis*, in cui il prolungamento dei lati lunghi si estende anche nella parte posteriore del tempio, senza fornire tuttavia un accesso diretto alla cella interna. All'interno dell'atrio, si osservano delle panchine posizionate ai lati, elemento che in molti megara può estendersi anche alla base del muro della cella. Originariamente, il pavimento dell'atrio era spesso realizzato con lastre di pietra locale, conferendo al luogo un carattere solenne e distintivo. Le panchine basse presenti possono essere collocate anche alla base dei muri esterni, svolgendo funzioni di ricalzo o fungendo da supporto per le offerte. Inoltre, queste panchine possono servire come piano di appoggio per basamenti litici dotati di fori, concepiti per esporre spade votive e bronzi figurati (FADDA 2017). L'atrio, dunque, riveste un ruolo centrale nella disposizione e nella funzionalità del megaron, fungendo da spazio di transizione e introduzione agli

ambienti interni. La presenza di panchine, sia all'interno che alla base dei muri, suggerisce una concezione attentamente progettata, mirata ad accogliere non solo i praticanti dei rituali, ma anche a offrire un luogo di supporto per le cerimonie e l'esposizione di oggetti sacri. La presenza di basamenti litici con fori, dedicati all'esposizione di spade votive e bronzi figurati, aggiunge ulteriore complessità al significato simbolico e rituale del *megaron*. Questi fori rappresentano punti focali destinati a ospitare oggetti di valore e importanza spirituale, contribuendo a sottolineare la sacralità del luogo e la connessione con il divino. La copertura doveva essere in travature lignee che sorreggevano lastre di pietra, e con un timpano non dissimile da quello che si può ancora ammirare a Su Tempiesu di Orune (FADDA 2009; SALIS 2018). Le pareti erano probabilmente finemente rifinite con un intonaco a base di argilla (FADDA 2008, 2012). Un recinto, il *temenos*, di varie forme e dimensioni, ma prevalentemente sub-ellissoidale, circondava il *megaron*, delimitando un'area sacra arricchita da allestimenti funzionali dedicati alla raccolta delle offerte votive, alla celebrazione di riti sacri e all'accoglienza dei pellegrini, forse privi di accesso all'interno del tempio. Il *temenos* assumeva un ruolo fondamentale nella configurazione spaziale del complesso sacro, fungendo da connessione tra il *megaron* e il contesto circostante. La delimitazione dell'area sacra (più ideale che fisica, poiché i recinti avevano un elevato modesto) è una pratica già presente nell'Eneolitico, ad esempio con i recinti e circoli megalitici (CASTALDI 1999; MELIS 2004; MORAVETTI 2000B, 2004). Queste imponenti strutture creavano un contrasto evidente con le più contenute dimensioni dei templi, che metteva in luce l'importanza strategica di questi spazi di aggregazione nell'ambito del complesso sacro. Il *temenos* non era semplicemente un elemento perimetrale, ma rappresentava un punto di convergenza essenziale durante le ricorrenze religiose. Durante tali occasioni, il recinto poteva trasformarsi in un vivace centro di attività, fungendo da luogo di scambio commerciale, esposizione per la vendita di ex voto, spazio per gare di abilità e raduno degli animali offerti. Questi animali, successivamente sacrificati, diventavano il fulcro dei banchetti rituali destinati alla comunità riunita attorno al tempio. L'ampiezza del *temenos* consentiva lo svolgimento di diverse attività

simultanee, creando un ambiente dinamico e partecipativo durante le celebrazioni religiose. La presenza di una porta monumentale e di un vestibolo sottolineava l'importanza cerimoniale dell'accesso al recinto, conferendo al luogo un'aura di sacralità e risalto. La sua vastità e la sua configurazione strategica lo rendevano un punto focale durante le festività, svolgendo un ruolo cruciale non solo nell'aspetto rituale ma anche in quello sociale ed economico della comunità aderente alla religione del tempio. La diffusione dei *megaron*, allo stato attuale delle ricerche, sembra prediligere le aree montane, in particolare quelle a controllo di particolari vie di comunicazione, utilizzate nella transumanza delle greggi ancora oggi (FADDA 2017). Il *megaron* si configura come un'architettura straordinaria, non solo per le sue caratteristiche strutturali, ma soprattutto per l'attenzione ai dettagli nell'organizzazione degli ambienti e per la presenza di elementi come panchine e basamenti litici. Questi dettagli non solo conferiscono alla struttura un carattere distintivo, ma sottolineano anche l'importanza delle pratiche rituali e delle espressioni simboliche all'interno della civiltà che ha dato vita a tali costruzioni.

Tra i *megara* classici noti alla storia degli studi che presentano le medesime caratteristiche planimetriche riscontrabili in quelli individuati da Levi a Serra Orrios di Dorgali si possono menzionare il tempio di Domu de Orgia-Esterzili (di dimensioni ragguardevoli, che verrà descritto in maniera più approfondita nei prossimi capitoli), i tre templi di S'Arcu 'e is Forros di Villagrande Strisaili, Romanzesu di Bitti, il tempio di Gremanu a Fonni, quello di Sos Nuratolos a Alà dei Sardi. Meno noti quelli di Orconale di Norbello, di Monte Canu a Palau e Monte Cardiga-Villaputzu (FADDA 2017). La muratura dei templi, realizzata a sacco con grossi blocchi parallelepipedi di pietra locale, ha spessori ragguardevoli, come nel caso del tempio C di Romanzesu, che raggiunge 1,75 metri di spessore. Esistono delle varianti planimetriche, come quella del tempietto di Malchittu di Arzachena (ANTONA 1992) e quella del tempietto in *antis*, o come la definì il Taramelli "capanna del capo", di Santa Vittoria di Serri (FADDA 2017). Nel primo la struttura assume una planimetria sub-rettangolare, caratterizzata da una parte terminale absidata che comprende vestibolo e camera. Seguendo la prassi comune nei templi in *antis*, le pareti del vestibolo sono

ottenute mediante l'estensione delle pareti laterali. Sul lato posteriore, si individua l'accesso alla camera, provvisto di architrave e finestra di scarico. Il vano principale presenta una forma rettangolare, con una lunghezza di circa 8 metri. Nel secondo lo sviluppo planimetrico vede un corpo di forma circolare, con diverse nicchie che si aprono nella muratura, a cui si accede da un vestibolo con sedile, che in origine doveva avere una copertura a doppio spiovente. Il *temenos* che racchiude il tempietto ingloba altre due capanne circolari. A questa tipologia appartengono anche i templi di Janna 'e Pruna di Irgoli (MASSETTI 2013), Sa Carcaredda di Villagrande Strisaili (CAMPUS 2012; SALIS 2015), Sos Nuratolos di Alà dei Sardi (MANCINI 2015), Su Monte di Sorradile (LEONELLI 2012; SANTONI 2015), Sirilò di Orgosolo (CONGIU 2009). Questi edifici di culto sono stati utilizzati sia nell'età del Bronzo che nell'età del Ferro inoltrata, come dimostra la presenza di materiali databili all'VIII secolo a.C., tra cui panelle e lingotti di rame (il che indica fenomeni di tesaurizzazione) e bronzi figurati, con fenomeni di riutilizzo in età storica (FADDA 2013).

Il culto dell'acqua

L'aspetto cultuale maggiormente conosciuto e diffuso nella Sardegna delle età del Bronzo e del Ferro e senza dubbio quello connesso alle strutture templari connesse al culto dell'acqua, con lo sfruttamento e la canalizzazione delle vene sorgive del sottosuolo o di quelle che affiorano in superficie. Soprattutto in quelle fasi del Bronzo Finale e del Ferro in cui il nuraghe perde la sua importanza sociale e politica, talvolta divenendo esso stesso luogo di culto, i villaggi si incentrano attorno alle strutture templari, alle quali è senza dubbio connessa anche l'attività politica delle *elite* locali (DEPALMAS 2005; SANTONI 1990). Pozzi e fonti sacre hanno sono ben distribuiti in tutta l'isola; le scelte insediative sono naturalmente condizionate dagli aspetti geomorfologici del territorio e dalla presenza o meno di vene sorgive. Risulta inoltre importante distinguere gli edifici connessi al culto da quelli utilizzati semplicemente per l'approvvigionamento idrico. Non è da escludere che dei semplici pozzi realizzati inizialmente per questioni pratiche siano poi divenuti edifici sacri (SALIS 2017). È il caso, ad esempio, del pozzo presente nella torre Nord del

nuraghe Santu Antine di Torralba (CAMPUS-USAI 2015), del nuraghe Nurdole di Orani (FADDA 2013, 2015) o del nuraghe Cuccuru Nuraxi di Settimo San Pietro (ATZENI 1987). La frequentazione dei luoghi e l'edificazione delle strutture templari iniziano sicuramente già nel Bronzo Medio, come dimostrano i dati provenienti da Funtana Coberta di Ballao (MANUNZA 2015) e nel Bronzo Recente, come dimostrano i risultati delle indagini nei contesti di Su Putzu di Orroli, Romanzesu di Bitti, Cuccuru is Arrius di Cabras (FADDA-POSI 2006; SANTONI 1990; SEBIS 1987). Il dato archeologico mostra una intensa fase di utilizzo di questi edifici nel Primo Ferro (IALONGO 2011), ma le caratteristiche costruttive, i confronti, il fatto che gli edifici sorgano in luoghi precedentemente abitati riportano ad una datazione molto più alta (PAGLIETTI 2015). Nessun'altra costruzione nuragica, nemmeno tra le *tholos* più imponenti, è realizzata con tanta attenzione e cura dei dettagli quanto i pozzi sacri: questo aspetto estetico sottolinea la grande importanza che questa civiltà dava al culto dell'acqua. La realizzazione dei pozzi richiedeva l'utilizzo di pietre dure ma allo stesso tempo lavorabili, come il basalto, la trachite o il calcare, ognuna delle quali veniva, se necessario, importata e selezionata in base al tipo di lavorazione, ottenendo come risultato effetti di policromia apprezzabili ancora oggi (SALIS 2017). Gli scavi archeologici hanno dimostrato come i pozzi fossero destinati alle offerte di oggetti di grande valore. La presenza delle spade e delle armi in genere in questi luoghi consente di conferire allo strumentario in bronzo un valore simbolico (CICILLONI 2015). Il *temenos* è presente nei pozzi sacri così come nei templi a *megaron*, a sottolineare la necessità e la volontà di delimitare l'area sacra; vi sono poi casi particolari, come a Romanzesu di Bitti, in cui si annettono al pozzo grandi vasche gradonate, la cui funzione potrebbe essere legata alle abluzioni sacre o altre manifestazioni legate al culto nei momenti di piana (FADDA-POSI 2006). Gli elementi architettonici che consentono di individuare una funzione legata al culto sono l'atrio (rettangolare o trapezoidale), la *tholos* e i gradini, che in taluni casi vengono realizzati anche quando non sono necessari, come a Su Tempiesu di Orune, la cui vena sorgiva si trova in superficie (FADDA 1988). Gli elementi distintivi della fonte sacra restano comunque l'atrio e la *tholos*, realizzata anche di piccole dimensioni. Talvolta la

vena sorgiva viene intercettata nelle vicinanze o direttamente sulla parete, come nel caso di Su Lumarzu di Bonorva (BONINU 2009), talvolta l'acqua vi arriva con una condotta appositamente realizzata, come a Nuddole di Nuoro (FADDA 1988). Un'altra tipologia templare diffusa a partire dal Bronzo Recente è rappresentata dagli edifici templari a pianta circolare, nella cui tipologia dovrebbe rientrare anche la "capanna del capo" o tempietto in *antis* sopra descritto di Santa Vittoria di Serri. All'interno di queste strutture sono spesso presenti elementi che inducono a pensare ad un uso di carattere cultuale degli edifici, come bacili, focolari o modelli di nuraghe. È il caso queste planimetrie si riscontrano, ad esempio, a Sos Nurattolos di Alà dei Sardi (MANCINI 2015), Janna'e Pruna di Irgoli (FADDA 2013), Su Monte di Sorradile (SANTONI 2015). Anche edifici di piccole dimensioni come le "rotonde" di Su Nuraxi di Barumini, Sa Mandra 'e sa Giua di Ossi, Sant'Imbenia di Alghero, San Luca di Ozieri, Santa Barbara di Bauladu, Abini di Teti, Concaniedda di Sedinì, Bonorchis di Sorradile, Sirai di Carbonia, rientrano in questa tipologia (PERRA 2012). Singolare il caso della "rotonda" di Sa Sedda'e Sos Carros di Oliena, in cui lungo il paramento murario, dotato di sedile, sono scolpite delle protomi di ariete con un foro passante collegate ad una canaletta, che permettevano di convogliare l'acqua all'interno di un bacile posto al centro dell'ambiente (SALIS 2008, FADDA 2013).

I santuari

Nell'età del Ferro gli edifici di culto eretti nei periodi antecedenti vengono sia utilizzati che ristrutturati e, soprattutto, inseriti i grandi santuari: ne costituiscono degli straordinari esempi, per citarne soltanto alcuni dei più rappresentativi, Santa Vittoria di Serri, Santa Anastasia di Sadara, Romanzesu di Bitti (UGAS 2009). Questi luoghi assumono un'importanza strategica, di tipo "federale", in quel passaggio che avviene dall'età del Bronzo a quella del Ferro; caratteri sociali, economici e politici nuovi, dovuti anche all'arrivo di popolazioni non indigene e urbanizzate nell'isola, portano ad un momento di grandi mutamenti, ma sempre in maniera graduale o "liquida" (BERNARDINI 2017). I grandi insediamenti mantengono importanza e vitalità, ma spesso le

opere murarie in fase di decadenza non subiscono opere di importante ristrutturazione. Il villaggio-santuario rappresenta un elemento di novità e soprattutto di rottura con il passato: l'attività cerimoniale si snoda tra il sacro e il profano, con luoghi distinti destinati alla funzione religiosa, al commercio o all'artigianato.

5.2.5. La statuaria bronzea nuragica

Una delle manifestazioni culturali e artistiche più note della Sardegna protostorica, al pari delle architetture, è sicuramente legata alla produzione dei bronzi figurati. La presenza di questi prodotti della metallurgia sarda, che rappresentano nelle forme più varie figure mitologiche, umane, zoomorfe, navicelle, modelli di architetture nuragiche, è nota fin dal '700 nelle varie collezioni private e museali (LO SCHIAVO 2014). Le sculture bronzee sono realizzate da sapienti artigiani con la tecnica della cera persa e la loro diffusione avviene prevalentemente nell'età del Ferro, in qualità di ex-voto offerti nei santuari o, soprattutto in ambito extra-insulare, nelle sepolture. Esse ammontano ad un numero di oltre seicento esemplari (CONTU 1997), studiati e classificati in primo luogo dal Lilliu (LILLIU 1966, 1997). Egli distinse le sculture bronzee in due grandi categorie: lo stile barbaricino-mediterraneizzante nella sua "essenza originaria" e quello geometrico, naturale o storico, a cui si potrebbero far risalire anche le sculture in pietra di Mont'e Prama (UGAS 2009). Singolari i modelli di edifici templari e di nuraghi, che riproducono i monotorre e i bastioni polilobati. Una delle figure più rappresentate è sicuramente quella del guerriero: con spada, con stocco e scudo, fromboliere, arciere. Non mancano gli sportivi, come i lottatori e i pugilatori, i musici, così come le scene che riproducono in maniera diretta attività legate al culto: oranti, offerenti con animali selvatici e domestici, con piatti ricchi di libagioni o con brocche. Ben rappresentato anche il cosiddetto capo tribù. Tra le figure femminili si hanno soprattutto donne con bambino o sacerdotesse. Tra i più singolari gli eroi, demoni o figure mitologiche. Anche la fauna, domestica e selvatica, compare in numerose raffigurazioni: cinghiali, cervi, mufloni, colombe, bovini, pecore e montoni, cani o volpi, cavalli. Da Serri e da Oschiri provengono due carretti nuragici, mentre sono almeno centocinquanta le navicelle (DEPALMAS 2014). Si è dibattuto a lungo su cosa realmente rappresentassero le sculture in bronzo nuragiche, soprattutto quelle antropomorfe: alcuni di essi potevano raffigurare dei ed eroi di una complessa mitologia, riflessione di un politeismo ormai radicato anche nell'isola, in sostituzione dei culti di carattere naturalistico del passato (UGAS 2009); altri la

società dell'epoca, soprattutto quella aristocratica, o una società passata e ormai mitizzata, quella dei costruttori di nuraghi. In quest'ultima categoria rientrano soprattutto i militari e i sacerdoti, forse anche i lottatori e gli sportivi, coloro che avevano diritto a possedere le armi e controllavano il potere politico e religioso. Sono poi rappresentate tutte le classi sociali, comprese quelle più umili (LILLIU 1966, 1997). Nella bronzistica, in sostanza, si ritrova tutta la società sarda con grande realismo, nell'aspetto esteriore arricchito dalle vesti, dagli utensili o dalle armi, come in quello puramente espressivo.

5.2.6. Il tempio a megaron di Domu de Orgia (Esterzili) e il pozzo di Santu Antinu (Genoni). Inquadramento culturale e cronologico.

Il tempio di Domu de Orgia a Esterzili

A 1000 metri di altitudine, sul monte Cuccureddi di Esterzili, lungo le importanti vie di transumanza che i pastori della Barbagia percorrevano verso i pascoli più caldi del Gerrei e del Salto di Quirra (FADDA 2006), a breve distanza da un recinto ciclopico e dal villaggio nuragico con annesso complesso di fonti in località Monti Nuxi, si erge il tempio di Domu de Orgia (o *Urxia*), il tempio a *megaron* più grande dell'isola (FADDA 2017).



Fig. 32 - Il tempio a megaron di Domu de Orgia a Esterzili visto dall'alto (fonte: FADDA 2017).

Il sito è noto da tempo alla bibliografia: l'Angius e il Della Marmora lo interpretano come avamposto militare di epoca romana; il Lilliu, che denota grande interesse per questa tipologia di edifici, lo colloca nel Tardo Bronzo, sottolineando la derivazione elladica e anatolica del modello, accostandolo ai *megara* delle civiltà palaziali a esso contemporanee (LILLIU 1947, 2010); anche il Contu lo accosta ai *megara* preellenici, intravedendo in esso una testimonianza dell'influenza micenea nell'isola (CONTU 1948); il Barreca lo intravede confronti con il tempio tripartito di Gerusalemme, dandone una lettura di chiara derivazione medio-orientale, datandolo al V secolo a.C. (BARRECA 1986); le indagini archeologiche, in particolare quelle svolte nel 2003, hanno permesso di avere una lettura più chiara dell'edificio, che fino ad allora si basavano esclusivamente su confronti di carattere architettonico. L'edificio è costruito con grossi blocchi di scisto parallelepipedi che si alternano a filari costituiti da blocchi più piccoli, per dare maggiore solidità alla struttura. Ha una pianta rettangolare con pareti laterali leggermente aggettanti (22,50 m di lunghezza, 8 m di larghezza e un'altezza massima residua di 2,40 metri), doppiamente *in antis*, con ingresso a sud e tutti gli ambienti dotati di sedile, interrotto in quello centrale da una lastra ortostatica. Il vestibolo ha forma pressoché quadrata (5,15 x 5,00 m); l'ambiente principale, o cella, ha forma quadrangolare (8,00 x 4,50 m); il terzo ambiente, una sorta di *sancta sanctorum*, nella tradizione accessibile soltanto al clero facente funzione, è il più piccolo (3,25 x 4,50 m). All'interno sono stati trovati resti di intonaco, di una copertura litica e di battuto pavimentale. Il *temenos* ha una ellittica irregolare (50 x 30 m, 135 m di perimetro), residua di pochi filari, copre delle strutture riferibili al bronzo recente e ingloba due capanne. Nel corso degli scavi sono stati rinvenuti undici bronzi figurati, rappresentanti un'unica scena e probabilmente offerti da un facoltoso pellegrino. Sono presenti due sacerdotesse, con lunghi capelli lisci, mantello, in atto di preghiera e con una fiaccola o braciere sulla mano sinistra. Un orante maschile con copricapo, tunica, pugnale a elsa gammata che offre una brocca sorretta da una cordicella. Un altro offerente simile al precedente, privo della testa, con un'olla sempre sorretta da una cordicella. Un altro orante con tunica che offre un piatto, la figura centrale e più maestosa della scena. Un

arciere con elmo cornuto, corazza e gonnellino, con abbigliamento dalle fattezze orientali. Un offerente che porta sulle spalle un muflone. Diverse figure zoomorfe, tra cui un toro con una volatile (forse una colomba) sul capo, un muflone, un altro volatile con foro passante (probabilmente per l'inserimento di un pugnale o una spada), un grande cervo con un cane che gli azzanna il collo. Le figure animali sono molto ben curate, cave nel corpo, con rappresentazione schematica di occhi, bocca e genitali maschili. Il repertorio di offerte rinvenute prosegue con ceramiche di alta qualità, tra cui vasi miniaturistici; il rituale sembra in linea con quelli documentati nei luoghi di culto legato all'acqua. Il santuario di Domu de Orgia è legato a un'antica credenza locale, quella della sacerdotessa o maga Urxia, che custodiva all'interno di un contenitore il tesoro del tempio. In un altro vaso era invece presente sa *musca macedda* (mosca macellaia), che difendeva l'area sacra dai profanatori. Le figure hanno evidenti affinità stilistiche con i bronzi rinvenuti nell'importante santuario di Santa Vittoria di Serri e in altri monumenti della vicina Ogliastra. (FADDA 2001, 2006, 2013, 2017).



Fig. 33 - Domu de Orgia - Esterzili. Veduta frontale prima del restauro, con le operazioni di rilievo in corso.

Il pozzo di Santu Antinu a Genoni

Il pozzo di Santu Antinu, luogo di rinvenimento dei tre bronzi oggetto del presente studio e di numerosi materiali databili dal periodo nuragico al II sec. a.C. (GUIDO *ET ALII* 2015), è sito nell'omonima collina, una piccola giara a nord-ovest dell'abitato di Genoni e a nord della grande giara di Gesturi. Essa ha una modesta altitudine (591 m. s.l.m.), una lunghezza di 152 m, una larghezza di 42 m e occupa un'area di circa 6.800 metri quadrati. Sul lato settentrionale e meridionale sono presenti delle murature di rinforzo (GUIDO *ET ALII* 2015). La presenza di industria litica è testimonianza della frequentazione umana sin dal Neolitico (GUIDO 1991), mentre per il periodo nuragico le evidenze più importanti sono le due torri del nuraghe e il pozzo a sezione circolare, che ha una profondità di circa 40 metri e risulta essere rivestito con pietra calcarea di importazione e non con il basalto locale. Elementi in pietra lavorata rinvenuti nel corso degli scavi, in particolare la chiave di volta e il timpano in trachite rosa, indicano a pensare che il tempio avesse una struttura non dissimile da quella di Su Tempiesu di Orune. Si hanno frequentazioni puniche, tanto che il Moscati classificò come tale il torrione (MOSCATI 1980). Sul lato meridionale della collina è presente una necropoli tardo-romana, mentre sulla terrazza ha trovato posto una chiesa medievale dedicata ai Santi Costantino ed Elena. Le indagini stratigrafiche sono state condotte dal 1980 al 1993, con l'ottenimento di importanti risultati soprattutto con lo scavo del pozzo. Negli strati di epoca nuragica vi sono stati rinvenuti pugnali in bronzo, un'elsa di pugnale in avorio di elefante, vasi rituali, una fiasca del pellegrino (*Pilgrim flask*). Tra gli oggetti più interessanti vi sono senza dubbio i tre bronzi figurati oggetto del presente studio. Il primo rappresenta una figura stante, di sesso maschile, interpretata come rappresentazione di una divinità, un eroe o comunque un personaggio di alto rango. Indossa esclusivamente un copricapo a calotta e una collana ritorta che discende sul petto. Gli occhi sono affossati, il naso e il mento ben evidenti. Il braccio destro è spezzato all'estremità e piegato verso il basso, quello sinistro regge un bastone con tre noduli discoidali. Le gambe sono unite, le dita dei piedi ben rappresentate, il sesso realizzato con una protuberanza (FOIS 2015). Segue la figura di un orante, con la mano destra alzata in segno di preghiera e

sproporzionata rispetto al corpo. Il copricapo è a calotta, gli occhi e la bocca realizzati con piccole fossette e il naso triangolare. Il busto presenta mammelle sporgenti e il vestiario è costituito da un gonnellino. L'avambraccio destro, con cui probabilmente portava un'offerta, è spezzato (MERELLA 2015). Infine, un acciarino di carro a sezione circolare, con l'estremità inferiore arrotondata e un foro di forma ovale per l'inserimento della coppiglia. La parte superiore ha una capocchia circolare sormontata dalla rappresentazione di un piccolo quadrupede, forse una volpe, in posizione vigile; l'oggetto ha tracce di decorazione a rappresentare la pelliccia e le dita (FOIS 2015).



Fig. 34 - Il colle di Santu Antine a Genoni (fonte: www.gooristano.com).

5.3. Il passaggio dall'età imperiale al medioevo in Sardegna.

Le ricerche svolte negli ultimi anni, sia sulle fonti letterarie che sul campo, hanno consentito di delineare un quadro più completo, ma non ancora esaustivo, della Sardegna in età Tardoantica, ovvero in quel momento di passaggio tra l'età romana e gli inizi del medioevo. Si nota una persistenza degli insediamenti in quei centri urbani già occupati nelle fasi precedenti, fino a quando una concatenazione di eventi non ne causò l'abbandono (MARTORELLI 2017). L'età Tardoantica si fa iniziare generalmente con Diocleziano e termina convenzionalmente con la caduta dell'Impero d'Occidente nel 476. Questo periodo si configura anche in Sardegna come un momento di passaggio in cui caratteri tipici dell'età romana si fondono con nuovi elementi, soprattutto quelli derivanti dal processo di cristianizzazione dello stato (MELONI 1975). Fu proprio il processo di cristianizzazione a permettere alla Sardegna di mantenere la sua centralità nei fenomeni che modificarono l'assetto del mondo occidentale in questa fase di grandi cambiamenti (MASTINO 2009). L'amministrazione della Sardegna non subì in realtà grandi cambiamenti, al contrario della società. Il territorio isolano era ancora suddiviso in grandi latifondi per lo sfruttamento delle risorse agricole, spesso con manodopera schiavizzata. Grazie alle sue produzioni, soprattutto cerealicole, e alla destinazione del grano egiziano prevalentemente all'area orientale dell'Impero, la Sardegna continuò a rivestire una grande importanza anche nel IV secolo. Anche le miniere, soprattutto quelle dell'iglesiente, e la probabile presenza di filoni di metalli preziosi da sfruttare, permisero all'isola di mantenere una certa importanza. Tra IV e V secolo una serie di eventi turbolenti interessarono l'Impero, con un progressivo indebolimento della parte occidentale, che influirono negativamente sui commerci e provocarono delle difficoltà negli spostamenti da e per l'isola. Fu in questo periodo, sotto l'imperatore Valentiniano III, che la Sardegna dovette affrontare l'invasione dei Vandali, restando in parte sotto il loro dominio per circa ottant'anni (IBBA 2010). È possibile che in questo periodo alcune città sarde, tra cui Careles, Tiris Libisonis, Nora, Tharros, siano state fortificate

(PANI ERMINI 1988). Una delle più importanti testimonianze archeologiche delle incursioni vandale è rappresentata dal ritrovamento dei relitti di dieci navi nel porto di Olbia (D'ORIANO 2002; PIETRA 2004). Il dominio vandalo non sovvertì le ben radicate istituzioni romane, limitandosi ad una sostituzione di cariche (SPANU 2002). In soli ottant'anni si susseguirono nove sovrani, sette dei quali filoariani e anticattolici, con la Sardegna che divenne terra d'esilio per molti cattolici (MODÉLAN 2003). L'arrivo del clero esiliato, in gran parte africano, pose le basi per l'evangelizzazione delle zone interne e per una grande diffusione del monachesimo (ARTIZZU 1992). Al Concilio di Cartagine del 484 parteciparono cinque vescovi sardi e, nonostante l'arianesimo professato dai vandali ne fosse uscito indebolito, non vi furono particolari ripercussioni per i praticanti dell'isola e per il clero, fedele al credo niceno. Per quanto riguarda gli insediamenti il tessuto cristiano locale e quello vandalo si inserirono nel paesaggio urbano tardo-imperiale; le città più importanti divennero sede di diocesi. Al governo vandalo pose fine nel 534 l'intervento dell'imperatore d'Oriente Giustiniano. A seguito della conquista bizantina vi fu un immediata riorganizzazione dell'assetto amministrativo: la provincia sarda venne affidata a un governatore (con sede a Carales) e un comandante (con sede a Forum Traiani). L'età bizantina, di cui si hanno pochi documenti ma importanti dati archeologici, vide la riorganizzazione della società sarda, ponendo le basi e fungendo da raccordo tra l'età Tardoantica e quella giudiciale (COSENTINO 2002).

5.3.1. Il passaggio dall'età imperiale al medioevo in Ogliastro.

L'età romana

Il quadro insediativo dell'Ogliastro in età romana, come di tutta la Sardegna centro-orientale, non è ancora esaustivo, soprattutto a causa della mancanza di indagini stratigrafiche (DIRMINTI 2023). Gran parte dei dati provengono da indagini di superficie e da ritrovamenti fortuiti, che fanno comunque pensare ad un quadro ben più complesso di quello noto (ARCHEOSYSTEM 1990A; ROWLAND 1981). Sulla base delle indagini svolte nell'ultimo trentennio si potrebbe affermare che nell'area ogliastrina sono presenti pochi centri urbani di dimensioni ragguardevoli (anche citati nelle fonti) e una serie di centri secondari (TRUDU 2014). Tra quelli noti *Sulpicius Portus* e *Sulci* a Tortolì, *Custodia Rubrienses* a Bari Sardo, *Porticenses* a Tertenia, *Sarcapos* a Villaputzu (MASTINO-RUGGERI 2000); in diverse località edifici chiesastici vengono edificati sopra le rovine di terme romane, come ad Arzana, Tortolì, Ulassai (CAVALLO 1987; ROWLAND 1981). In territorio di Tertenia è documentato il riutilizzo di siti nuragici, anche con il ritrovamento di ripostigli (CANNAS 1972, 1999).

L'età bizantina

L'altomedioevo, che inizia con la definitiva riconquista dell'isola da parte dei bizantini nel 552, è un periodo altrettanto difficile da delineare a causa della mancanza di informazioni, sia di carattere storico-letterario che archeologico. Non sappiamo se l'areale ogliastrino fosse sotto lo stretto controllo dei bizantini o se rientrasse in quella parte dell'isola in cui è testimoniata una forte resistenza al governo centrale e legittimato (MARRAS 2023A). L'Itinerario Antonino menziona diversi insediamenti sulla *a Portu Tibulas Caralis*, la strada che collegava Carales con tutta la costa orientale dell'isola: tra questi insediamenti si trova un *Sarpach* (probabilmente *Sarcapos*, a Santa Maria di Villaputzu) e un *Sariapis* (forse *Saralapis*-Sarrala, presso Tertenia), un *Porticenses* (Sarrala o

Fusti'e Carca). Numerosi i siti nuragici in cui è testimoniata una frequentazione altomedievale; tra questi Barisoni, proprio a Tertenia, e Canali Figu a Lotzorai (ARCHEOSYSTEM 1990B). Alcune chiese rurali di Tertenia mostrano frequentazioni molto antiche; è il caso di San Marco, Sant'Elia, Sant'Ambrogio, Sa Cresia'e Su Guventu.

5.3.2. Il contesto di Fusti'e Carca a Tertenia.

Il sito di Fusti 'e Carca è localizzato nel territorio comunale di Tertenia (NU), circa 3 chilometri a sud dell'abitato, e 120 metri ad ovest del tracciato dell'ormai ex Strada Statale 125. La sua scoperta fortuita ha consentito di ottenere importanti informazioni su una fase della storia sarda, quella di età Tardoantica e altomedievale, di cui si conoscono pochissimi stanziamenti in aree extraurbane. L'indagine e lo studio dei materiali hanno rivelato una lunghissima frequentazione dell'area, dagli inizi del IV secolo a.C. fino alla metà del VI d.C. Le fasi di cui si conservano le testimonianze più evidenti sono quelle di età imperiale (con un tratto di strada basolata, probabilmente la *a Portu Tibulas Caralis*, databile agli inizi del III secolo d.C., al tempo dell'imperatore Caracalla, tra il 211 e il 217 d.C.) e, soprattutto, quelle edilizie che vanno dal tardo IV secolo alla metà del VI d.C. L'area è stata indagata solo in parte: lo scavo è stato infatti interrotto sul lato ovest della collina, in cui si intuisce chiaramente che i tratti murari e la strada basolata proseguono. I quarantaquattro ambienti costituiscono un unico agglomerato, distribuito su tre parti distinte: in quella a valle trovano spazio un grande cortile a cielo aperto, un pozzo (che ha restituito importanti resti faunistici e fittili), tre fornaci e un tratto di strada; il corpo centrale, di forma rettangolare, insiste sul tratto rettilineo di strada, inglobandolo nell'edificio e riutilizzandolo come pavimentazione. Qui trovano spazio gli elevati murari e le stratigrafie meglio conservate, che hanno consentito di individuare più fasi edilizie (oltre a quella principale vi sono state diverse fasi di ristrutturazione) e le tracce di almeno due incendi, l'ultimo dei quali ha causato l'abbandono del sito con conseguente rito. Nella parte alta della collina, in cui trova spazio una vasca di spegnimento della calce, i lavori agricoli e gli spietramenti hanno fatto sì che i muri e gli strati archeologici si conservassero in pessimo stato (MANCINI 2023).

Resumen Capítulo 5: Marco cronológico y cultural de los contextos analizados

El Calcolítico en Cerdeña y la sepultura de Corti Beccia en Sanluri

El capítulo proporciona una visión general del Calcolítico sardo, centrándose en las culturas desarrolladas durante la primera Edad de los Metales, desde las etapas finales del IV milenio a.C. hasta el III milenio a.C. Se destaca cómo gran parte del Calcolítico sardo debe sus características a una evolución lenta y gradual desde la cultura de San Michele di Ozieri. La Facies Sub-Ozieri, o Ozieri II, es un momento de la Prehistoria sarda caracterizado por importantes transformaciones. El término "Sub-Ozieri" fue acuñado por primera vez por Ugas G. basándose en los descubrimientos realizados en la década de 1980 en los yacimientos de Su Coddu-Selargius y Terramaini-Pirri. Se inserta en la línea evolutiva que va desde el Ozieri clásico hasta el Filigosa y el Abealzu. La presencia de materiales metálicos, principalmente utensilios como punzones, punzones y puñales con mango, es una característica distintiva del Sub-Ozieri. Los asentamientos se desarrollan en áreas agrícolas y cerca de zonas húmedas, con cabañas elípticas o sub-circulares hechas de postes y ramas, algunas con espacios subterráneos para silos o hogares. El uso de adobes se vuelve más común. La alimentación incluye caza de ciervos, jabalíes y corzo, junto con la cría de ovejas, cabras, vacas y cerdos, y la pesca, especialmente de moluscos. Se documentan enterramientos con inhumaciones individuales y colectivas. Entre los contextos culturales, en Monte d'Accoddi el segundo templo incorpora la forma troncopiramidal del anterior, mientras que continúa la difusión de estatuillas de arcilla o lítica, aunque menos frecuente que en la fase Filigosa. Esta, inicialmente asociada con la de Abealzu, representa una fase evolutiva de las culturas de Ozieri y Sub-Ozieri, con un origen común. Toma su nombre de la necrópolis hipogea de Filigosa, ubicada cerca de Macomer. En comparación con el Ozieri clásico, el Filigosa muestra una continuidad en los asentamientos preexistentes y en los tipos de construcción. También emergen características defensivas en algunos asentamientos, como San Giuseppe di Padria. Los análisis esqueléticos indican un aumento en el consumo de vegetales, sugiriendo un incremento significativo de la importancia de la actividad agrícola. Las dataciones sugieren un desarrollo de Filigosa en la primera mitad del III milenio a.C.,

parcialmente contemporáneo con la cultura de Monte Claro. En esta fase, se observa un aumento significativo de artefactos metálicos en los ajuares funerarios, destacando una mayor atención a los productos derivados de la actividad metalúrgica, con los puñales adquiriendo un papel simbólico. En el ámbito cultural y funerario, se observan algunas novedades, como el uso de la reversión en las estatuas-menhir y la evolución de las estatuillas femeninas en placa perforada. Los enterramientos incluyen tanto tumbas individuales como dobles. Se reanuda la excavación de las tumbas hipogeas, con la difusión de las *domus de janas* de desarrollo longitudinal, caracterizadas por formas y distribuciones de ambientes diferentes a las fases anteriores. Se observa una cultura material más sobria y esquemática, típica de la Edad del Bronce. La facies de Abealzu toma su nombre de la localidad homónima entre Sassari y Osilo, que incluye una necrópolis hipogea y un asentamiento eneolítico. Las pocas dataciones disponibles se basan principalmente en la cultura material encontrada en los yacimientos. La cerámica y las arquitecturas no muestran una diferenciación significativa, pero la *facies* Abealzu se distingue por el uso de cobre, plomo y plata en la metalurgia. La producción cerámica se caracteriza por formas simples con pocas decoraciones. El aspecto cultural muestra una transición gradual desde el Neolítico hasta el Calcolítico, evidente en las estatuas-menhir y en los santuarios, como el de Monte d'Accoddi, que distinguen claramente el área de culto de la sepulcral. La cultura de Monte Claro, toma su nombre de la colina homónima de Cagliari, se desarrolló en el III milenio a.C. Originalmente pensada como una fase nurágica arcaica, resultó ser una línea evolutiva distinta de las culturas de Filigosa y Abealzu. Se difundió rápidamente en toda la isla, caracterizada por asentamientos y arquitecturas ciclópeas. Los asentamientos varían, y presentan estructuras fortificadas en altura. El ritual funerario muestra variaciones regionales, con enterramientos en hipogeos, tumbas en fosa y cistas líticas en el sur, mientras que en el norte son menos distintivos. Las evidencias arqueológicas muestran la presencia de monumentos megalíticos asociados con Monte Claro, como círculos de piedras y alineamientos. La cultura del Vaso Campaniforme alcanzó Cerdeña durante el Calcolítico, mezclándose con la facies de Monte Claro y Bonnannaro, atestiguándose principalmente en contextos funerarios, extendidos por toda la isla. Las tumbas se

han encontrado en cuevas, abrigos, hipogeos reutilizados, dolmenes y cistas líticas. Sin embargo, el ritual funerario no está bien documentado debido a los frecuentes saqueos de las tumbas. La cultura del Vaso Campaniforme ha dejado huellas significativas en varios yacimientos, como Anghelu Ruju en Alghero y Padru Jossu en Sanluri. La cerámica campaniforme muestra influencias de Europa occidental y central, con una aparición gradual de los rasgos distintivos de la cultura de Bonnanaro. Esta cultura marca el final del Calcolítico en Cerdeña, influenciando las fases posteriores de la Edad del Bronce. La localidad de Corti Beccia en Sanluri, ubicada en la llanura del Campidano, fue un importante poblado durante el Calcolítico, con evidencias de las culturas de Abealzu, Monte Claro y del Vaso Campaniforme. El descubrimiento de una sepultura monumental permitió la recuperación de un significativo ajuar funerario perteneciente a la cultura de Abealzu, con anillos de plata, cuentas de collar, industria lítica y vasijas miniaturísticas. La tumba, excavada en el 2010, contenía los restos óseos de un número indeterminado de individuos. El ajuar funerario presenta similitudes con otras sepulturas de la región, como Serra Cannigas en Villagrecia y Santa Caterina di Pittinuri en Cuglieri.

La Edad Nurágica y los contextos de Domu de Orgia en Esterzili y Santu Antinu en Genoni

La Edad del Bronce Reciente se caracteriza, en Cerdeña, por un auge económico y demográfico, con un aumento significativo de las estructuras ciclópeas, en particular de los *nuraghi*. Estas estructuras, símbolo mismo de esta civilización, muestran una evolución progresiva, que desde las primeras construcciones ciclópeas irregulares lleva a los *nuraghi* clásicos, con formas tronco-cónicas y cámaras de *tholos*. Durante esta fase, también se observa la ampliación de los *nuraghi* existentes y la construcción de nuevos complejos, evidenciando una planificación previa. Los asentamientos se concentran principalmente en áreas de altura, con viviendas circulares o rectangulares y una tendencia a intensificar el uso del suelo agrícola. Comienzan a emerger lugares de culto relacionados con el agua, lo que indica una creciente complejidad social y religiosa. En el Bronce Final, se producen cambios significativos en la sociedad sarda, con una redefinición del

papel de los nuraghi y una mayor complejidad en las viviendas y prácticas agrícolas. Los poblados se desarrollan alrededor de los *nuraghi*, integrando sus espacios y reutilizando los materiales de derrumbe. La actividad agrícola experimenta un notable desarrollo, con la construcción de silos y contenedores para la conservación de productos. La deforestación se hace evidente, indicando un aumento de la presión humana sobre el territorio. La arquitectura de los asentamientos se vuelve más compleja, con viviendas organizadas alrededor de patios centrales y una mayor variedad de formas de los espacios. El Bronce Final representa una fase de transformación gradual pero significativa en la historia nuragica, marcando la transición a una sociedad proto-urbana. En la Edad del Hierro, se confirma la tendencia a reducir las intervenciones de reestructuración de los *nuraghi*, con los poblados que se convierten en el centro de la vida política, social y económica. Las viviendas se organizan alrededor de patios centrales, con una mayor complejidad en las formas de los espacios. Se observan las primeras evidencias de viabilidad y se diferencian las áreas destinadas al culto, a la producción artesanal y a los consejos políticos. Los asentamientos muestran características proto-urbanas, marcando una fase avanzada en la civilización nuragica. En el Bronce Reciente, las prácticas funerarias muestran cierta continuidad con respecto a la fase anterior. Las tumbas de gigantes del Bronce Medio son reutilizadas, con depósitos que a menudo siguen las mismas prácticas, sin cambios significativos. Sin embargo, se observan sepulcros contruidos con la técnica isodoma y la difusión de tumbas sin exedra, lo que sugiere un posible cambio en los rituales funerarios. También aumenta el número de objetos de valor en los ajuares, como metales, adornos de vidrio y ámbar, vasijas miniaturísticas y objetos de hueso. En el Bronce Final, las manifestaciones arquitectónicas en los asentamientos y lugares de culto no encuentran correspondencia con las prácticas funerarias, que continúan utilizando las tumbas de gigantes, aunque no se construyen nuevas. Se documentan tumbas de corredor, semihipogeos y pozo. En la Edad del Hierro, se difunden las necrópolis con enterramientos individuales, como las de Monte Prama en Cabras, de Antas en Fluminimaggiore y de Is Aruttas en Cabras. Los enterramientos se realizan en pozo, con el difunto acurrucado en su interior, a veces señalado por un túmulo de piedras

o una losa y una escultura de piedra. También se encuentran fosas individuales y abrigos rocosos.

Los templos *in antis* y a *megaron* son estructuras de culto peculiares presentes en Cerdeña, que datan del período comprendido entre el Bronce Medio y la Edad del Hierro avanzada. Estos edificios, diferentes de los *nuraghi* y viviendas más comunes, se caracterizan por tener una planta rectangular y una arquitectura que recuerda a los "*megara*" de las civilizaciones palaciegas del Egeo. El término *megaron* fue acuñado, para referirse a los casos sardos, por Doro Levi en 1936 durante las primeras exploraciones del poblado de Serra Orrios en Dorgali, donde se identificaron estos edificios con muros rectos. Tienen una forma rectangular con lados largos que se extienden hacia adelante, delineando un vestíbulo de entrada a los espacios internos. Dentro del vestíbulo hay bancos que sugieren una preocupación por recibir a los practicantes de los rituales y proporcionan apoyo para las ceremonias. Además, hay basamentos de piedra con agujeros destinados a la exhibición de objetos sagrados, como espadas votivas y bronceos figurados, lo que agrega complejidad al significado ritual del templo. El *temenos*, un recinto subelipsoide, rodea el *megaron*, delimitando un área sagrada para la recolección de ofrendas votivas y la celebración de ritos sagrados. Los templos a *megaron* se distribuyen principalmente en áreas montañosas, controlando las rutas de comunicación utilizadas en la trashumancia del ganado. La mampostería de los templos está hecha con grandes bloques de piedra local, con espesores considerables, y las cubiertas están compuestas por vigas de madera y losas de piedra. Es probable que las paredes internas estuvieran acabadas con estuco de arcilla.

Además de los templos a *megaron*, también son comunes los pozos sagrados y fuentes dedicadas al culto del agua, con estructuras de templos que aprovechan y canalizan las venas de agua. Estos lugares sagrados están bien distribuidos en toda la isla y demuestran la importancia atribuida al culto del agua en la civilización nuragica. En la Edad del Hierro, los templos preexistentes se utilizan y se reconstruyen, y se erigen nuevos grandes santuarios, como Santa Vittoria di Serri y Santa Anastasia di Sardara, adquiriendo importancia estratégica y federal en el contexto del paso de la Edad del Bronce a la Edad del Hierro.

La producción de bronce figurados representa una de las expresiones culturales y artísticas más significativas de la Cerdeña prehistórica. Estas obras, realizadas con maestría por hábiles artesanos utilizando la técnica a la cera perdida, se realizaron principalmente durante la Edad del Hierro y se ofrecieron como exvotos en los santuarios o se colocaron en tumbas, especialmente fuera de la isla. El número de bronce figurados supera las seiscientas unidades, que representan una amplia gama de temas, incluidas figuras mitológicas, humanas, zoomorfas, barcos y modelos de arquitectura nuragica. Las representaciones más comunes incluyen guerreros con armas y escudos, atletas como luchadores y boxeadores, músicos, así como escenas relacionadas con el culto con orantes y oferentes. Las figuras femeninas, como mujeres con niños o sacerdotisas, también están bien representadas, al igual que la fauna doméstica y salvaje. Entre las obras más singulares se encuentran los modelos de edificios templarios y nuragicos, que reproducen las características arquitectónicas de los monumentos sardos. La gran variedad de temas representados ha alimentado debates sobre su significado, con interpretaciones que van desde la mitología hasta la reproducción del aspecto social y político de la época. La escultura en bronce nuragica ofrece una visión realista de la sociedad sarda de la época, mostrando todas las clases sociales y enriqueciendo el cuadro con detalles realistas de las vestimentas, los utensilios y las armas utilizadas.

El templo de Domu de Orgia, ubicado en el monte Cuccureddi de Esterzili a 1000 metros de altitud, es un importante sitio arqueológico en la región. Rodeado por las rutas de trashumancia utilizadas por los pastores de la Barbagia, es el templo a *megaron* más grande de la isla. Las investigaciones arqueológicas realizadas en 2003 permitieron una mejor comprensión de su estructura, que incluye paredes construidas con bloques de esquisto y una planta rectangular con entrada al sur. Dentro del templo se encontraron restos de estuco, cubiertas de piedra y pavimentos, además de once bronce figurados que representan una escena única, probablemente ofrecidos por un peregrino de alto nivel social. Estas figuras incluyen sacerdotisas, orantes masculinos, arqueros y diversas figuras zoomorfas, todas con evidentes afinidades estilísticas con otros bronce encontrados en la región. El templo está asociado con una antigua creencia local relacionada con la figura de la sacerdotisa o maga Urxia, que se creía que custodiaba el tesoro del

templo. La escena representada también muestra afinidades estilísticas con otros importantes santuarios de la zona, como el de Santa Vittoria di Serri.

El pozo de Santu Antinu es un importante sitio arqueológico ubicado en la colina del mismo nombre, al noroeste del pueblo de Genoni y al norte de la gran jarra de Gesturi. Las investigaciones arqueológicas realizadas en el sitio han revelado la presencia de industria lítica desde el Neolítico, mientras que para el período nuragico han surgido evidencias significativas, incluidas dos torres del nuraghe y un pozo de sección circular con una profundidad de aproximadamente 40 metros, revestido con piedra caliza importada. Durante las excavaciones se encontraron elementos de piedra labrada, como la llave de la bóveda y el tímpano de trachita rosa, lo que sugiere que la estructura del templo en el sitio podría ser similar a la de Su Tempiesu de Orune. Las investigaciones estratigráficas realizadas de 1980 a 1993 han proporcionado resultados importantes, especialmente con la excavación del pozo, donde se encontraron numerosos artefactos que datan desde la época nuragica hasta el siglo II a.C. Entre los objetos más interesantes encontrados en el pozo hay tres bronceos figurados, además de dagas de bronce, una empuñadura de daga de marfil de elefante, vasijas rituales y una botella de peregrino (*pilgrim flask*), que proporcionan valiosa información sobre la vida y las prácticas de las antiguas comunidades que habitaban la región.

La Edad Tardoantigua en Cerdeña y el contexto de Fusti'e Carca en Tertenia

La época Tardoantigua en Cerdeña, que transcurre entre la época romana y el comienzo de la Edad Media, ha sido testigo de una serie de cambios que han moldeado la sociedad y el paisaje de la isla. La cristianización ha desempeñado un papel significativo en este contexto, permitiendo que Cerdeña mantenga una posición central en los grandes cambios que estaban ocurriendo en el mundo occidental. Aunque la administración de la isla no experimentó grandes cambios, la sociedad experimentó transformaciones significativas. La economía sarda, basada principalmente en la agricultura y la minería, mantuvo cierta relevancia gracias a la producción de cereales y la exportación de trigo hacia el área oriental del Imperio. Sin embargo, una serie de eventos turbulentos entre los siglos IV y V, incluida la invasión de los Vándalos durante el gobierno de Valentiniano III, llevó a una

gradual decadencia económica y una disminución del comercio. La invasión vándala causó un cambio de liderazgo, pero dejó muchas instituciones romanas intactas. Sin embargo, la presencia vándala provocó el exilio de muchos católicos y contribuyó a la difusión del monaquismo en Cerdeña. A pesar de las diferencias religiosas entre los Vándalos y el clero católico, las prácticas religiosas de la isla no sufrieron repercusiones significativas. El dominio vándalo duró alrededor de ochenta años, antes de que la intervención del emperador de Oriente, Justiniano, en el 534 pusiera fin al reino. Con la conquista bizantina, Cerdeña experimentó una reorganización administrativa, con la provincia sarda confiada a un gobernador y un comandante. Este período marcó una fase de transición entre la Edad Tardoantigua y la judicatura, con importantes implicaciones para la sociedad y la organización política de la isla.

La transición de la época imperial a la Edad Media en Ogliastra, una región del centro-este de Cerdeña, es un período poco claro debido a la falta de datos históricos y arqueológicos exhaustivos. Durante la época romana, los asentamientos ogliastrinos se caracterizaban por la presencia de pocos centros urbanos de tamaño significativo, como *Sulpicius Portus*, Sulci en Tortolì, *Custodia Rubrienses* en Barì Sardo, *Porticenses* en Tertenia y *Sarcapos* en Villaputzu. Sin embargo, la información sobre este período sigue siendo limitada debido a la falta de investigaciones estratigráficas, con la mayoría de los datos provenientes de investigaciones superficiales y hallazgos ocasionales. También se han documentado casos de reutilización de asentamientos nurágicos para la construcción de edificios eclesiásticos, como en Arzana, Tortolì y Ulassai, y el descubrimiento de escondites en el territorio de Tertenia. Durante el período bizantino, que comenzó con la reconquista de la isla en el 552, la información es aún más escasa. No se sabe con certeza si el área estaba bajo control de los bizantinos o si formaba parte de las zonas de la isla donde había una fuerte resistencia al gobierno central. Sin embargo, el Itinerario Antonino menciona varios asentamientos a lo largo de la ruta que conectaba Carales con la costa oriental de la isla, incluidos *Sarpach* (probablemente Sarcapos), *Sariapis* (quizás Saralapis-Sarrala) y *Porticenses*. Se han identificado numerosos yacimientos nurágicos que muestran signos de ocupación incluso en la Alta Edad Media, como Barisoni en

Tertenia y Canali Figu en Lotzorai. Algunas iglesias rurales de Tertenia también muestran una antigüedad, como San Marco, Sant'Elia, Sant'Ambrogio y Sa Cresia'e Su Guventu.

El sitio arqueológico de Fusti 'e Carca, ubicado en el territorio de Tertenia (NU), ofrece información importante sobre la historia de Cerdeña, especialmente en la Edad Tardoantigua y la Alta Edad Media, períodos sobre los cuales hay pocos asentamientos conocidos en áreas rurales. El descubrimiento accidental del sitio ha revelado una larga secuencia de ocupación, desde principios del siglo IV a.C. hasta mediados del siglo VI d.C. Las evidencias arqueológicas más significativas incluyen un tramo de calzada que data del siglo III d.C., durante el reinado del emperador Caracalla, y estructuras edificadas entre finales del siglo IV y mediados del siglo VI d.C. Solo una parte del asentamiento ha sido investigada, ya que está claro que hay restos de muros y calzadas adicionales aún por explorar. El complejo, que consta de cuarenta y cuatro ambientes, se divide en tres partes: una zona baja con un patio, un pozo, hornos y un tramo de calzada; un cuerpo central rectangular que incorpora la calzada como pavimento y muestra diferentes fases de construcción y renovación, incluido la huella de al menos dos incendios que llevaron al abandono del lugar; una parte alta de la colina con una balsa de extinción de cal, donde las actividades agrícolas han comprometido seriamente el estado de conservación de las estructuras. Estos hallazgos ofrecen una contribución importante a la comprensión del asentamiento y la actividad humana en Cerdeña durante el período tardoantiguo y la Alta Edad Media, destacando la importancia de Fusti 'e Carca como yacimiento de estudio para arqueólogos e historiadores interesados en esta fase de la historia insular.

6. Il rilievo dei reperti archeologici

Il rilievo di un reperto archeologico è un passaggio che in maniera unanime viene considerato fondamentale per il suo studio e, in generale, per la divulgazione scientifica delle informazioni. Il disegno deve essere chiaro, preciso e deve evidenziare quelle che sono le principali caratteristiche dell'oggetto: stato di conservazione, morfologia, presenza di elementi decorativi. La restituzione grafica del reperto archeologico è necessaria per consentirne un immediato confronto. Nelle sue metodologie più tradizionali è sempre soggettiva e incidono in maniera decisiva le capacità tecniche e interpretative del disegnatore. Nell'ultimo ventennio la tecnologia ha aiutato gli archeologi ad ottenere dati sempre più oggettivi, con l'ausilio della fotografia digitale, della fotogrammetria digitale, dei 3D laser scanner, dei software CAD, tanto da arrivare a sviluppare apparati hardware e software dedicati³³. Per il rilievo dei piccoli manufatti è necessario utilizzare strumenti ad altissima risoluzione, dotati di una tecnologia nata per il controllo numerico di parti meccaniche o altri manufatti, poi trasferita al campo dell'archeologia (BORNAZ ET ALII 2011).

La tipologia degli oggetti da restituire graficamente è decisamente varia: manufatti in ceramica, reperti litici, lignei, ossei, metalli, talvolta integri ma spesso frammentari. Il dato si conserva oggettivo quando ad essere pubblicati e diffusi sono i risultati ottenuti dal sensore o dalla macchina (una fotografia digitale, una nuvola di punti da 3D laser scanner, un modello triangolato ottenuto attraverso un software di editing di *mesh* poligonali); nel momento in cui il disegnatore decide di rappresentare con un intervento di tipo manuale ed arbitrario alcuni elementi rispetto ad altri (escludendo, ad esempio, alcuni segni di usura dalla superficie o eseguendo un calcolo dell'inclinazione del frammento) si passa all'interpretazione, quindi alla soggettività, del disegno.

³³ Si veda, a titolo esemplificativo, il Laser Aided Profile, che permette di acquisire molto velocemente il profilo delle forme e di ricostruirne la circonferenza. www.laseraidedprofiler.com.

Questo avviene immancabilmente anche quando la restituzione finale avviene con l'utilizzo di un software CAD. Una delle maggiori differenze tra disegno tradizionale e nuove tecnologie è quindi rappresentata dal fatto che la selezione delle informazioni utili al disegno non avviene in fase di rilievo (momento in cui vengono acquisiti quanti più dati possibili) ma in fase di elaborazione, direttamente sui modelli, parziali o completi, ottenuti (BAGNOLO 2022).

Uno dei grandi vantaggi dei 3D scanner e delle tecniche fotogrammetriche è la possibilità di acquisire la *texture*, che permettono di ottenere modelli 3D dallo straordinario effetto fotorealistico e con una resa dei dettagli utile sia allo studio che alla divulgazione, non solo scientifica, delle informazioni. Con l'utilizzo di questi strumenti la restituzione grafica dei manufatti ha subito un'evoluzione: non si rilevano più soltanto gli elementi essenziali a delineare la tipologia dell'oggetto ma si ottengono numerose informazioni che sono peculiari dello stesso. Altro vantaggio è dato indubbiamente dalla maggiore precisione del dato acquisito rispetto al rilievo manuale (RUSSO ET ALII 2011).

Si presentano di seguito due casi di studio, su due diverse tipologie di materiali: il rilievo di una serie di vasetti miniaturistici e fusaiole in ceramica rinvenuti in una sepoltura eneolitica in località Corti Beccia a Sanluri (SU), con due diverse tecnologie: fotogrammetria digitale (SfM) e ZScan Micro; il rilievo di quattordici bronzetti nuragici, tre provenienti dal pozzo di Santu Antinu di Genoni (OR), undici dal tempio a megaron di Domu de Orgia di Esterzili (SU), con un sistema ZScan Micro, con uno scanner 3D a luce strutturata. Oltre alle tecniche applicate sono diverse anche le finalità del rilievo: nel primo caso si tratta di una restituzione grafica finalizzata allo studio e alla pubblicazione dei dati, con una restituzione di tipo tradizionale in 2D che si utilizza per la ceramica, naturalmente su CAD; nel secondo caso è invece finalizzato alla prototipazione dei bronzi per esposizioni museali.

6.1. Caso di studio: il rilievo dei vasi miniaturistici rinvenuti in una sepoltura eneolitica in località Corti Beccia (Sanluri).

Si presenta di seguito il rilievo di sei vasi miniaturistici e una fusaiola con due differenti tecniche: fotogrammetria digitale (SfM) e ZScan Micro.



Fig. 35 - Corti Beccia (Sanluri): vista frontale della sepoltura.

I reperti

Reperto	US 1006 n. 20 (1)
Descrizione	Vaso con alto collo troncoconico distinto con profilo a tratti rettilineo e tre prese forate posizionate sulla massima espansione del corpo biconico. Misure: altezza cm 8.8; diametro cm 5.1; spessore mm 3.0.
Rilievo ZScan Micro	24 immagini scattate con ZScan Micro (8 triplette). Tempi di rilievo: 11 minuti. Tempo per l'elaborazione del modello: 36 minuti. Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare
Rilievo SfM	36 immagini scattate con SfM. Tempi di rilievo: 10 minuti. Tempo per l'elaborazione del modello: 21 minuti Software: Agisoft Metashape; CloudCompare
Modello	Volume: 11,051 cm ³ Vertici: 208.163 Triangoli: 416.025

Immagine



Nuvola di punti

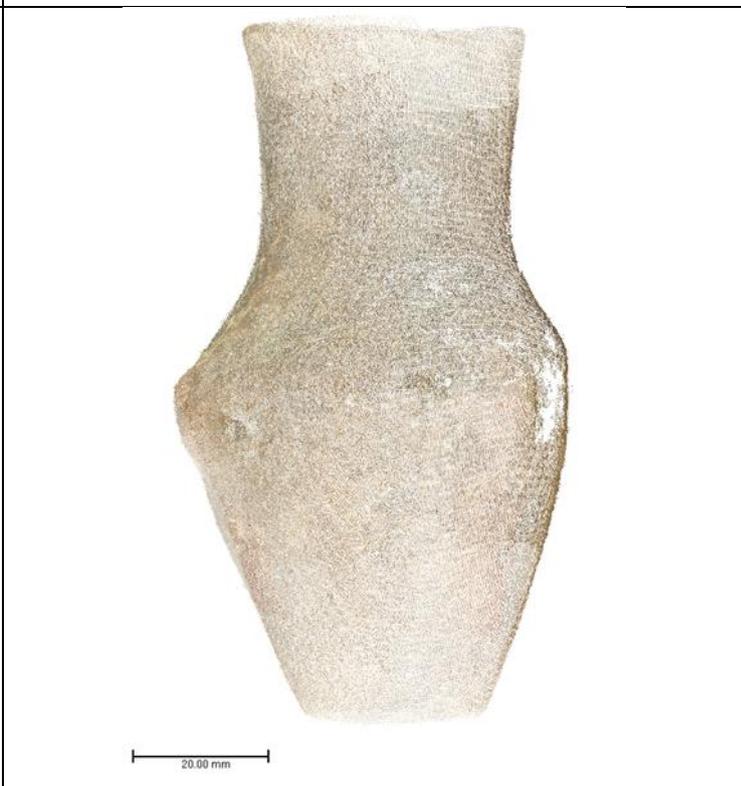


Reperto	US 1007 n. 19 (2)
Descrizione	<p>Vaso a collo cilindrico troncoconico nettamente distinto con orlo superiormente appiattito, spalla arrotondata, corpo troncoconico e fondo piatto. Due bugne/prese forate sub cutanee sono impostate sulla massima espansione ravvicinate e non contrapposte.</p> <p>Misure lineari: altezza 10,4 cm; diametro 6,1 cm; spessore pareti 3,5 mm</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>42 immagini scattate con ZScan Micro (14 triplette).</p> <p>Tempi di rilievo: 18 minuti.</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 59 minuti.</p> <p>Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>40 immagini scattate con SfM.</p> <p>Tempi di rilievo: 13 minuti.</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 26 minuti</p> <p>Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Modello	<p>Volume: 10,09 cm³</p> <p>Vertici: 389.390</p> <p>Triangoli: 768.231</p>

Immagine



Nuvola di punti



Reperto	US 1007 (3)
Descrizione	Vaso a collo cilindrico distinto con spalla arrotondata corpo troncoconico, orlo superiormente appiattito e fondo piatto. Misure: altezza 9,4 cm; diametro 7,2 cm; spessore pareti 4 mm
Rilievo ZScan Micro	27 immagini scattate con ZScan Micro (9 triplette). Tempi di rilievo: 12 minuti. Tempo per l'elaborazione del modello: 40 minuti. Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare
Rilievo SfM	35 immagini scattate con SfM. Tempi di rilievo: 12 minuti. Tempo per l'elaborazione del modello: 21 minuti Software: Agisoft Metashape; CloudCompare
Modello	Volume: 9,99 cm ³ Vertici: 282.864 Triangoli: 545.269

Immagine



Nuvola di punti



Reperto	US 1008 n.15 (4)
Descrizione	<p>Vaso biconico con collo a profilo concavo e orlo lievemente svasato. Corpo troncoconico con largo fondo piatto. Due bugne/prese forate sono impostate sulla massima espansione.</p> <p>Misure: altezza 9,3 cm; diametro 6,3 cm; spessore pareti 5 mm</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>21 immagini scattate con ZScan Micro (7 triplette).</p> <p>Tempi di rilievo: 10 minuti.</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 31 minuti.</p> <p>Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>33 immagini scattate con SfM.</p> <p>Tempi di rilievo: 11 minuti.</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 19 minuti</p> <p>Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Modello	<p>Volume: 9,32 cm³</p> <p>Vertici: 233.815</p> <p>Triangoli: 498.352</p>

Immagine



Nuvola di punti



Reperto	US 1011 n.11 (5)
Descrizione	<p>Olletta con pareti rientranti, forma globulare o ovoide orlo semplice e largo fondo lievemente convesso. Attacco di presa rotta al di sotto dell'orlo.</p> <p>Misure: altezza 6,6 cm; diametro 7,6 cm; spessore pareti 4 mm</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>21 immagini scattate con ZScan Micro (7 triplette).</p> <p>Tempi di rilievo: 10 minuti.</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 33 minuti.</p> <p>Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>30 immagini scattate con SfM.</p> <p>Tempi di rilievo: 10 minuti.</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 20 minuti</p> <p>Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Modello	<p>Volume: 7,19 cm³</p> <p>Vertici: 320.525</p> <p>Triangoli: 623.852</p>

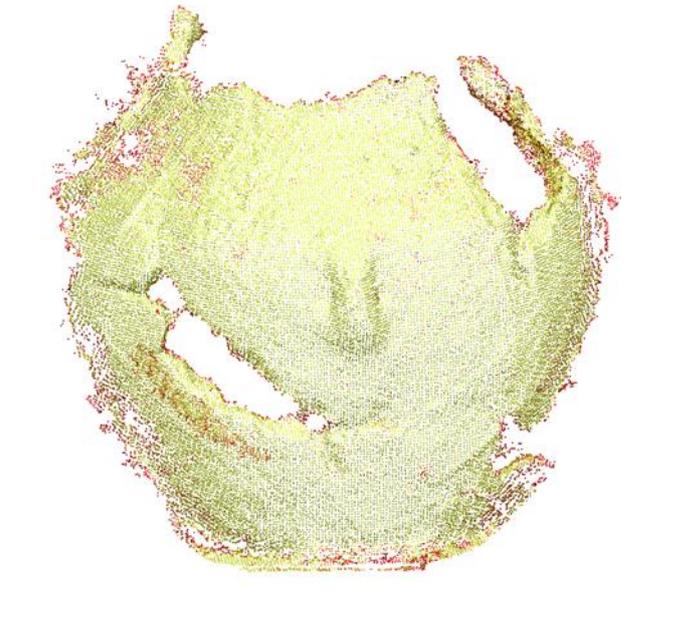
Immagine



Nuvola di punti



Reperto	US 1013 n.47 (6)
Descrizione	Vaso con spalla convessa marcatamente rientrante e forma complessiva biconica. Largo fondo piatto e anse forate impostate sulla massima espansione. Misure: altezza 12,4 cm; diametro 12,6 cm; spessore pareti 5 mm
Rilievo ZScan Micro	39 immagini scattate con ZScan Micro (13 triplette). Tempi di rilievo: 18 minuti. Tempo per l'elaborazione del modello: 58 minuti. Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare
Rilievo SfM	48 immagini scattate con SfM. Tempi di rilievo: 15 minuti. Tempo per l'elaborazione del modello: 32 minuti Software: Agisoft Metashape; CloudCompare
Modello	Volume: 17,44 cm ³ Vertici: 488.365 Triangoli: 965.326

<p>Immagine</p>	
<p>Nuvola di punti</p>	

Reperto	US 1013 n.27 (7)
Descrizione	Fusaiola biconica. Misure: altezza 4,2 cm; diametro 4,5 cm.
Rilievo ZScan Micro	18 immagini scattate con ZScan Micro (6 triplette). Tempi di rilievo: 7 minuti. Tempo per l'elaborazione del modello: 27 minuti. Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare
Rilievo SfM	20 immagini scattate con SfM. Tempi di rilievo: 7 minuti; Tempo per l'elaborazione del modello: 14 minuti Software: Agisoft Metashape; CloudCompare
Modello	Volume: 3,4 cm ³ Vertici: 158.788 Triangoli: 306.326
Immagine	

Nuvola di punti



20 mm

L'elaborazione dei dati

Il risultato finale di queste elaborazioni è stato, in entrambi i casi, un modello tridimensionale sottoforma di *mesh* (ottenuto dalla nuvola di punti densa), condivisibile su diverse piattaforme e in vari formati per l'estrazione di prospetti e sezioni dell'oggetto.

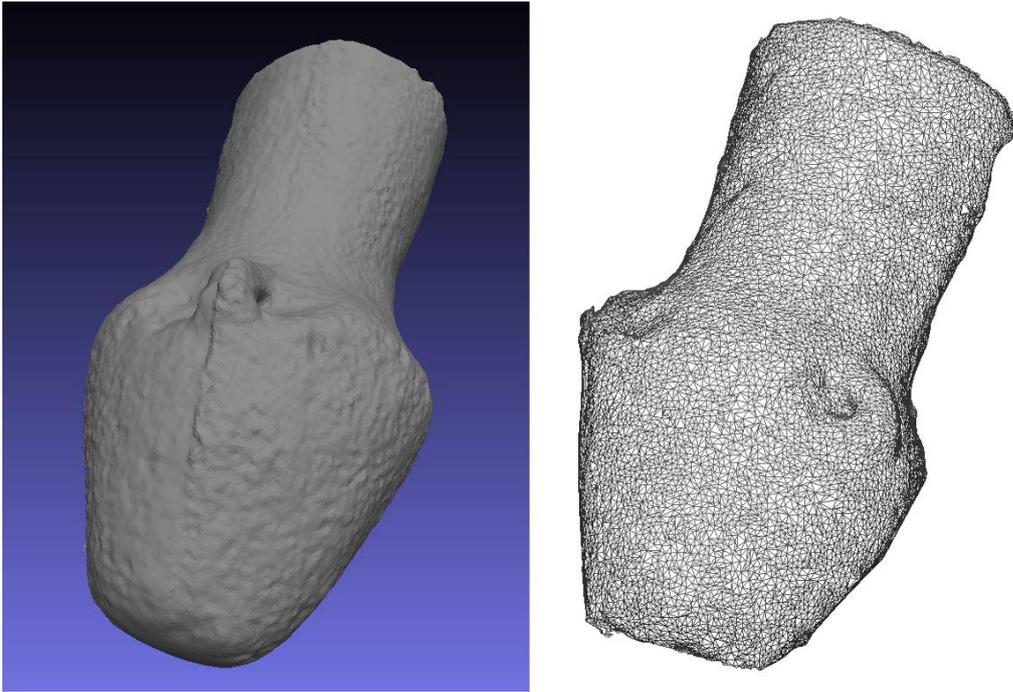


Fig. 36 - Mesh visualizzata come superficie e per triangoli.

L'estrazione dei dati bidimensionali dai modelli ottenuti con entrambe le tecniche ha richiesto l'utilizzo degli stessi software e delle stesse tempistiche. Con il software *open source* CloudCompare è stato possibile allineare i due modelli e verificare eventuali differenze nell'elaborazione degli stessi (Fig. 9). Questa sovrapposizione ha permesso in tutti i modelli di segnalare un buon livello di precisione. La successiva elaborazione del disegno è avvenuta su AutoCAD, con l'importazione delle sezioni ottenute in formato vettoriale DXF/DWG, l'impaginazione e la stampa finale in formato PDF o JPG (Fig. 37). Questo confronto ha permesso di evidenziare i punti di forza e di debolezza di entrambi i sistemi. Il rilievo per triplette dello ZScan Micro richiede solitamente più tempo rispetto al rilievo SfM e offre minore libertà di movimento, poiché la

barra elettronica deve essere stabilizzata su un treppiede o un piano e ogni qualvolta cambia la distanza dall'oggetto da rilevare è necessario fare una breve calibrazione dell'obiettivo. Ne consegue che è più semplice spostare l'oggetto da rilevare che la strumentazione, con la necessità di utilizzare supporti di vario genere per posizionarlo nella maniera corretta. I tempi di acquisizione della tripletta sono proporzionali alla lunghezza della baseline prescelta, in quanto la fotocamera si muove molto lentamente lungo la barra.

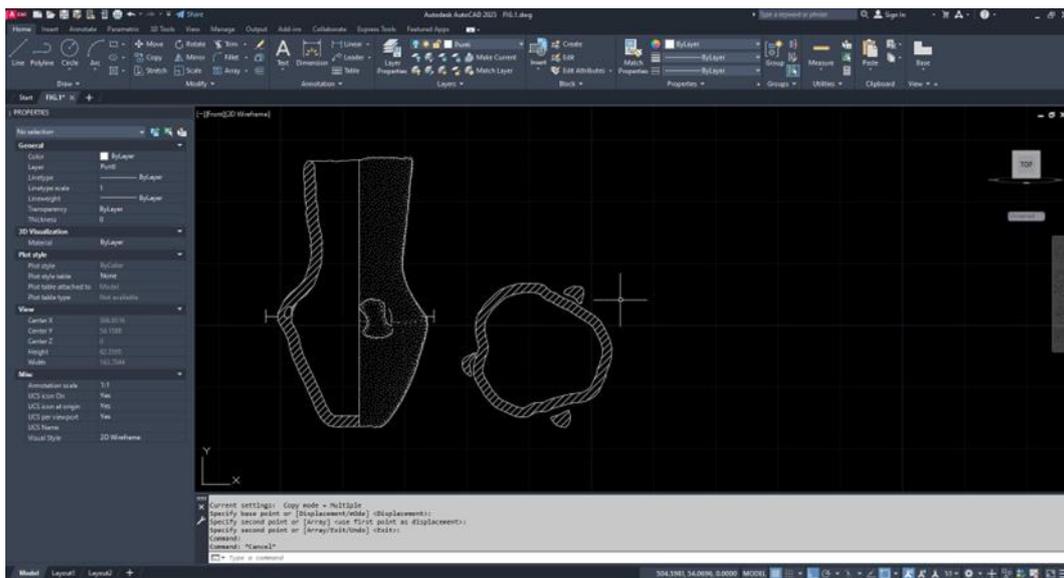


Fig. 37 - AutoCAD: disegno e restituzione grafica di un reperto.

Con il sistema SfM si può acquisire molto velocemente un numero di immagini superiore a quelle che servono effettivamente per elaborare il modello e senza grandi perdite di tempo, per poi fare una cernita di quelle realmente utili all'elaborazione; è consigliabile utilizzare uno sfondo neutro, per evitare di dover disegnare le maschere prima dell'allineamento delle immagini, operazione che richiede un grande dispendio di tempo. Con ZScan Micro è invece preferibile verificare immediatamente la qualità delle immagini per ridurre al minimo i punti di presa e i tempi di rilievo. ZScan Micro ha dei tempi di elaborazione del modello decisamente più lunghi, dovuti soprattutto alla necessità di utilizzare tre software prima di ottenere la *mesh*. Il primo software (ZScan Micro) serve ad acquisire i dati con la barra elettronica, il secondo

(ZScan) a elaborare le triplete di immagini per ottenere le nuvole di punti e il terzo (CloudCompare) ad allineare le singole nuvole e ottenere il modello finale. Con SfM si utilizza invece un solo software (nel nostro caso Agisoft Metashape) che allinea le immagini, elabora la nuvola densa e la *mesh*, texturizza il modello, operazioni che il sistema può svolgere in piena autonomia dopo che vengono inserite le impostazioni desiderate.

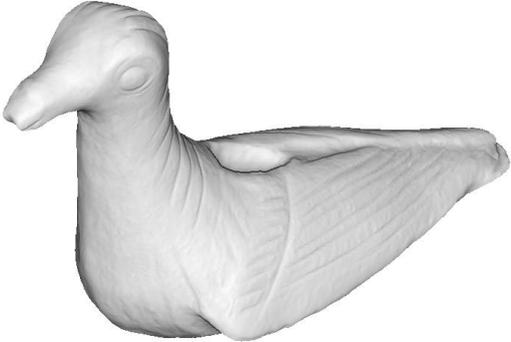
Pertanto, il sistema ZScan Micro ha dimostrato di avere come unici punti di forza la precisione e la possibilità di non utilizzare alcun riferimento metrico esterno: i risultati ottenibili con questo strumento e tutto il suo apparato di software sono infatti paragonabili a quelli di un 3D scanner a luce strutturata. I primi svantaggi si hanno già nel trasporto dell'attrezzatura: fotocamera, ottiche, treppiede o tavolo per dare stabilità allo strumento, lampade LED (non sempre gli ambienti in cui si è costretti a rilevare hanno una buona luminosità), valigetta contenente la barra elettronica e tutto il suo apparato di cavi di collegamento, PC per il controllo della barra. Con il sistema SfM sono sufficienti la fotocamera, le ottiche, i corpi illuminanti e, se si vuole lavorare con maggiore comodità e precisione, un piatto rotante e un treppiede fotografico. Come detto, questo sistema necessita di riferimenti metrici; nel caso del rilievo di piccoli oggetti è però sufficiente rilevare con un metrino o un calibro le misure principali dell'oggetto. Ne consegue che per il rilievo e la restituzione grafica della ceramica sia generalmente preferibile utilizzare il sistema SfM, ammenoché non si abbia la necessità di eseguire dei micro-rilievi per particolari finalità, come la prototipazione o la restituzione di superfici decorate. Altro aspetto non trascurabile è il costo dell'attrezzatura: se si esclude il costo del corpo macchina e degli obiettivi, quello del sistema ZScan Micro è quadruplo rispetto a una licenza di Agisoft Metashape Professional, senza dimenticare che esistono software SfM completamente gratuiti.

6.2. Caso di studio: il rilievo di 14 statue in bronzo rinvenute nei siti di Santu Antinu (Genoni) e Domu de Orgia (Esterzili)

Nel mese di gennaio del 2008 il comune di Esterzili aveva ottenuto un finanziamento per la realizzazione delle copie fedeli degli 11 bronzetti rinvenuti nel tempio a “megaron” di Domu de Orgia, esposti dal 2003 presso il Museo Archeologico Nazionale di Nuoro. Tali copie avrebbero dovuto arricchire l’offerta culturale del territorio con la loro esposizione in uno degli immobili comunali destinati all’offerta turistica, permettendo ai fruitori di visitare sia il luogo del rinvenimento che l’importante scena rappresentata. Il progetto del Comune di Esterzili rischiava però di non andare in porto, poiché le recenti direttive ministeriali vietavano su questa tipologia di manufatti l’esecuzione di calchi diretti (ad esempio in gomma siliconica) o di qualsiasi tecnica di rilievo a contatto. L’unica possibilità era rappresentata dall’esecuzione di un rilievo indiretto, che poco tempo dopo sarebbe stato previsto anche sui tre bronzi rinvenuti nel pozzo sito in località Santu Antinu nel territorio di Genoni. Se nel precedente caso di studio la finalità del rilievo era quella di ottenere dei modelli dai quali poter estrarre i disegni necessari al confronto e alla divulgazione scientifica dei materiali, in questo caso la finalità era la prototipazione. Le copie, realizzate con stampante 3D a getto di resina ad altissima precisione, sono state in seguito colorate da esperti restauratori per renderle, almeno visivamente, identiche alle originali. Di seguito si presenta una descrizione dettagliata delle operazioni di rilievo con l’utilizzo di tre diverse tecnologie: sistema ZScan Micro, fotogrammetria digitale (SfM), 3D scanner a luce strutturata.

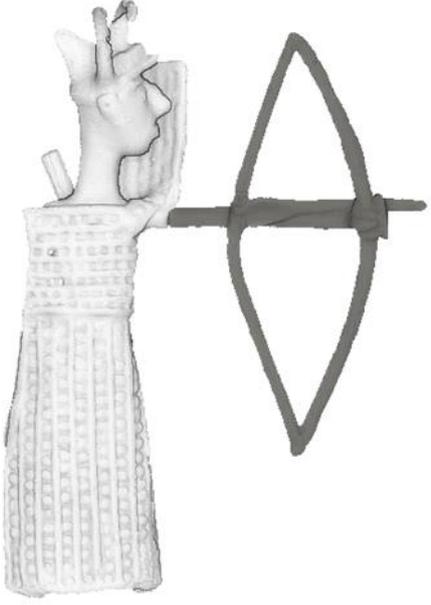
Reperto	Colomba (1)
Descrizione	<p>La figura rappresenta una colomba a riposo, realizzata a tuttotondo, con pochi con di ombra. La rappresentazione del piumaggio, degli occhi e del becco è particolarmente dettagliata. Il rilievo non ha presentato particolari criticità, se non per la presenza di un foro passante dal ventre al dorso, forse utilizzato per inserire il bronzo in un supporto, che ha accentuato la difficoltà nelle operazioni di rilievo. Il rilievo con ZScan Micro è risultato preciso, ma con le sue 30 triplette molto lungo in termini di tempo e di elaborazione. In questo caso il rilievo SfM è risultato molto speditivo, così come l'elaborazione della mesh, con un livello di lettura dei dettagli molto buono. Il rilievo con 3D scanner ha richiesto qualche minuto in più rispetto a quello SfM, ma nell'analisi della mesh si nota una maggiore accuratezza del dettaglio. In tutti i casi è stato necessario un intervento di <i>editing</i> per rappresentare in maniera corretta il foro passante.</p> <p>Superficie: parzialmente lucida e policroma.</p> <p>Misure: 6,8 x 4,5 x 3,6 cm.</p>
Rilievo ZScan Micro	90 immagini scattate con ZScan Micro (30 triplette). Tempi di rilievo: 36 minuti.

³⁴ Le misurazioni dell'arciere e di tutti i bronzi rilevati in più parti sono avvenute a seguito di un ricongiungimento virtuale dei frammenti.

	<p>Tempo per l'elaborazione del modello: 27 minuti. Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>20 immagini scattate con SfM. Tempi di rilievo: 7 minuti; Tempo per l'elaborazione del modello: 30 minuti Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Rilievo 3D scanner	<p>18 scansioni acquisite con 3D scanner. Tempo di acquisizione: 16 minuti; tempo per l'elaborazione del modello: 30 minuti.</p>
Modello	<p>Volume: 15,841 cm³ Vertici: 325.023 Triangoli: 650.046</p>
Immagine	
Mesh	

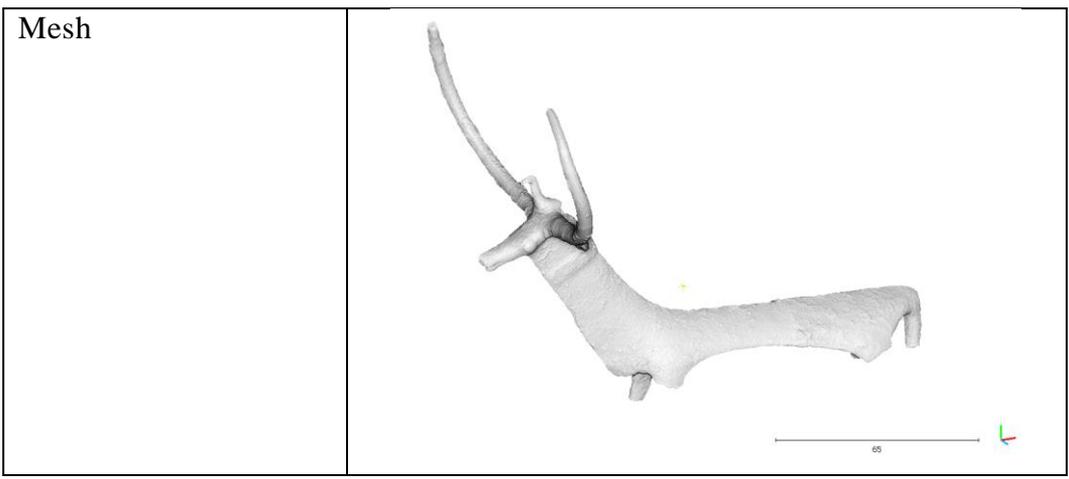
Reperto	Arciere (2)
Descrizione	<p>Il rilievo dell'arciere è stato particolarmente difficoltoso per diverse ragioni: il bronzo è suddiviso in due parti (il braccio destro, che sorregge l'arco, è staccato dal corpo a causa di una frattura); nell'arco è stato molto difficile trovare delle aree di sovrapposizione delle scansioni, rendendo necessari interventi di fusione delle mesh acquisite. La morfologia del corpo è particolarmente complessa, con una elevatissima cura dei dettagli; anche le parti della scultura non visibili ad un potenziale visitatore risultano, infatti, ben definite: il corpo è ricoperto da una veste molto aderente, l'armatura e la visiera sono decorate anche sul retro, l'elmo cornuto presenta una cresta e una visiera; il volto, le orecchie e la faretra sono ugualmente realizzate con grande cura. A tutto ciò si aggiunge un restauro approfondito della superficie, che risulta particolarmente lucida e, a tratti, monocroma. Le regolazioni dello scanner ottico hanno consentito di rilevare l'oggetto in ogni sua parte, con un numero accettabile di punti di presa e una continua regolazione della luminosità del proiettore; le due facce dell'arco sono state rilevate ugualmente con un ottimo livello di qualità, ma la modalità di registrazione delle mesh per punti comuni ha avuto bisogno di un intervento di "fusione" delle superfici rilevate. I rilievi eseguiti con ZScan Micro e SfM hanno presentato le medesime difficoltà, dovute soprattutto alla lucentezza e monocromia della superficie; sono</p>

	<p>stati molto dispendiosi in termini di tempo per raggiungere una buona qualità nell'accuratezza dei dettagli (soprattutto dell'armatura) sono state necessarie numerose sovrapposizioni di immagini.</p> <p>Superficie: lucida e monocroma.</p> <p>Misure: 14,1 x 10,1 x 2,3 cm.</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>225 immagini con ZScan Micro (75 triplete).</p> <p>Tempi di rilievo: 55 minuti.</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 95 minuti.</p> <p>Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>63 immagini scattate con SfM.</p> <p>Tempi di rilievo: 22 minuti;</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 30 minuti</p> <p>Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Rilievo 3D scanner	<p>45 scansioni acquisite con 3D scanner.</p> <p>Tempo di acquisizione: 20 minuti; tempo per l'elaborazione del modello: 45 minuti.</p>
Modello	<p>Volume: 25,308 + 3,246 cm³</p> <p>Vertici: 897.260</p> <p>Triangoli: 1.794.513</p>

<p>Immagine</p>	
<p>Mesh</p>	 <p>90</p> 

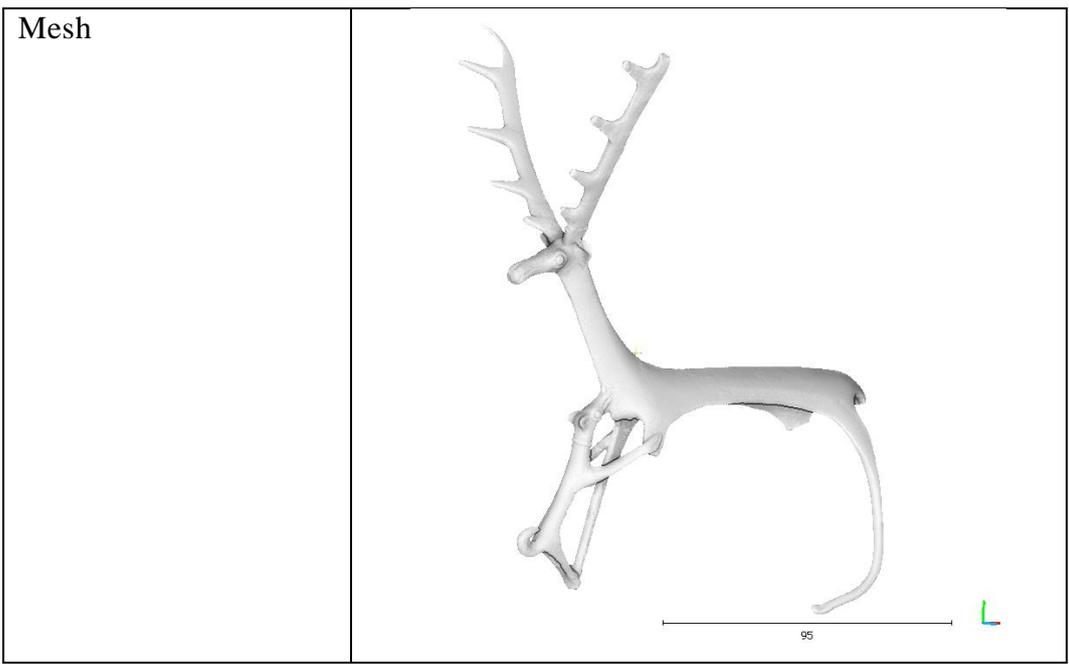
Reperto	Toro con colomba (3)
Descrizione	<p>La scultura rappresenta un toro di sesso maschile con un volatile, forse una colomba, stante sul capo; al corpo si aggiungono le tre gambe recuperate nel corso degli scavi, rilevate separatamente. Il muso dell'animale è molto pronunciato, le orecchie tese e schiacciate, la bocca appena pronunciata e gli occhi rappresentati come due protuberanze globulari particolarmente pronunciate e in parte fuori dalle orbite; il palco, di forma semicircolare, è molto evidente, soprattutto se l'osservatore si trova di fronte alla scultura. Le incrostazioni ancora presenti sulla superficie non hanno permesso di apprezzare e rilevare al meglio alcuni dettagli del manufatto, ma in compenso hanno semplificato le operazioni di acquisizione. Le maggiori difficoltà sono state riscontrate a causa del volume occupato dal palco, che ha reso impossibile l'acquisizione della figura intera sia di lato che frontalmente, rendendo necessarie un gran numero di scansioni e di immagini. Grandi difficoltà si sono riscontrate nell'allineamento del palco con le nuvole di punti derivanti da ZScan e da SfM. L'elevato numero di punti di presa è dovuto anche alla presenza di tre parti da rilevare. La qualità delle mesh è da considerarsi buona con tutte le tecniche utilizzate</p> <p>Superficie: opaca e policroma.</p> <p>Misure: 18,9 x 14,8 x 10,6 cm.</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>276 immagini con ZScan Micro (92 triplette).</p> <p>Tempi di rilievo: 68 minuti.</p>

	<p>Tempo per l'elaborazione del modello: 104 minuti. Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>78 immagini scattate con SfM. Tempi di rilievo: 27 minuti; Tempo per l'elaborazione del modello: 58 minuti Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Rilievo 3D scanner	<p>56 scansioni acquisite con 3D scanner. Tempo di acquisizione: 30 minuti; tempo per l'elaborazione del modello: 45 minuti.</p>
Modello	<p>Volume: 20,082 + 2,967 + 4,149 cm³ Vertici: 720.000 + 126.663 + 159.205 Triangoli: 1.441.550 + 253.322 + 318.406</p>
Immagine	

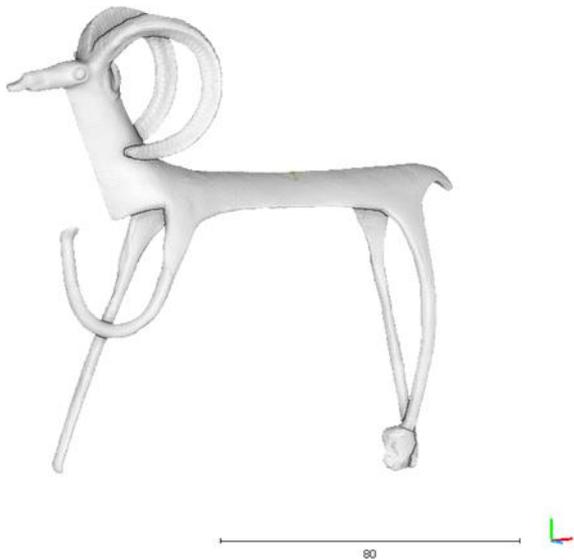


Reperto	Cervo con cane (4)
Descrizione	<p>Si tratta probabilmente della più singolare delle rappresentazioni. Il cervo è rappresentato insieme a un altro animale, un cane da caccia con collarino che gli azzanna il collo. La rappresentazione del corpo del cervo è molto simile a quella degli altri zoomorfi: i genitali risultano nascosti sotto il ventre cavo, le orecchie sono piatte, la bocca poco pronunciata e gli occhi globulari e sporgenti. Differisce il palco, con una forma a “V” e una ramificazione evidente. Il cane, lungo circa un terzo del cervo, ha gli occhi e la bocca rappresentati nello stesso modo, le orecchie più voluminose e con un padiglione rotondeggiante e una coda arricciata. Le difficoltà nell’acquisizione del dato sono state anche in questo caso legate alla voluminosità dell’oggetto e accentuate dalla presenza di maggiori coni d’ombra (dovuti alla rappresentazione del cane) e ad un restauro più approfondito che ne ha reso più lucida la superficie. I rilievi ZScan Micro e SfM sono fortemente lacunosi sia per la lucentezza che per la morfologia complessa dell’oggetto, rendendo necessari importanti interventi di <i>editing</i>.</p> <p>Superficie: lucida e policroma.</p> <p>Misure: 18,8 x 14,8 x 9,69 cm.</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>213 immagini con ZScan Micro (71 triplette).</p> <p>Tempi di rilievo: 53 minuti.</p> <p>Tempo per l’elaborazione del modello: 76 minuti.</p> <p>Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>

Rilievo SfM	<p>67 immagini scattate con SfM.</p> <p>Tempi di rilievo: 28 minuti;</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 55 minuti</p> <p>Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Rilievo 3D scanner	<p>49 scansioni acquisite con 3D scanner.</p> <p>Tempo di acquisizione: 29 minuti; tempo per l'elaborazione del modello: 43 minuti.</p>
Modello	<p>Volume: 21,450 cm³</p> <p>Vertici: 789.500</p> <p>Triangoli: 1.578.990</p>
Immagine	



Reperto	Muflone (5)
Descrizione	<p>La quarta specie rappresentata nella scena è il muflone, ancora una volta di sesso maschile, con gli arti, la forma cava del ventre e i tratti della testa molto simili ai precedenti cervidi. Differiscono naturalmente le corna ricurve, con le spirali particolarmente curate e ben evidenti. Il restauro non ha intaccato la tipica patina di colore verde del bronzo, limitando le aree con eccessiva lucentezza. La morfologia e le dimensioni dell'oggetto, nonché i numerosi coni d'ombra, ne hanno reso particolarmente difficoltoso il rilievo; la definizione del rilievo ottenuto con lo scanner ottico, soprattutto nella rappresentazione delle parti delle corna più difficili da scansionare, è risultata la più idonea alla finalità.</p> <p>Superficie: semi-lucida e policroma.</p> <p>Misure: 13,1 x 12,4 x 3,5 cm.</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>198 immagini con ZScan Micro (66 triplette). Tempi di rilievo: 49 minuti. Tempo per l'elaborazione del modello: 72 minuti. Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>63 immagini scattate con SfM. Tempi di rilievo: 27 minuti; Tempo per l'elaborazione del modello: 58 minuti Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Rilievo 3D scanner	<p>45 scansioni acquisite con 3D scanner. Tempo di acquisizione: 26 minuti; tempo per l'elaborazione del modello: 49 minuti.</p>

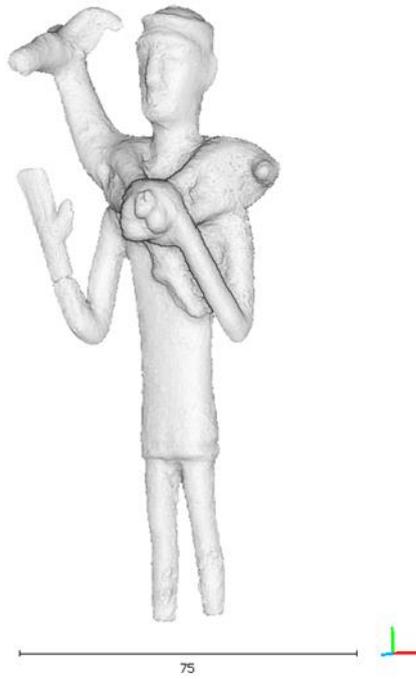
Modello	Volume: 16,784 cm ³ Vertici: 611.071 Triangoli: 1.222.134
Immagine	
Mesh	

Reperto	Offerente con ariete (6)
Descrizione	<p>Il primo degli offerenti rappresentati nella scena (privo delle gambe) porta un ariete sulle spalle e la mano destra alzata, un copricapo a calotta e il pugnale ad elsa gammata sul petto. La superficie, che presenta ancora incrostazioni, ha subito un restauro molto leggero (ad esclusione della mano destra, che è incollata). L'oggetto ha una morfologia abbastanza semplice. Con pochi coni d'ombra. Il rilievo è stato abbastanza semplice con tutti i sistemi utilizzati.</p> <p>Superficie: opaca e policroma.</p> <p>Misure: 13,7 x 6,1 x 3,9 cm.</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>105 immagini con ZScan Micro (35 triplette).</p> <p>Tempi di rilievo: 25 minuti.</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 36 minuti.</p> <p>Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>38 immagini scattate con SfM.</p> <p>Tempi di rilievo: 13 minuti;</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 22 minuti</p> <p>Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Rilievo 3D scanner	<p>21 scansioni acquisite con 3D scanner.</p> <p>Tempo di acquisizione: 12 minuti; tempo per l'elaborazione del modello: 33 minuti.</p>
Modello	<p>Volume: 34,941 cm³</p> <p>Vertici: 658.237</p> <p>Triangoli: 1.316.426</p>

Immagine



Mesh



Reperto	Offerente con piatto (7)
Descrizione	<p>Il secondo offerente porta ancora la mano destra alzata, un piatto con degli alimenti sulla sinistra in atto di offerta, una veste che copre in parte il pugnale ad elsa gammata, un copricapo. Tutti i dettagli del corpo e del volto sono ben visibili e dettagliati, anche grazie all'approfondita pulizia della superficie: le dita delle mani e dei piedi sono ben evidenti, così come i tratti del volto, comprese le sopracciglia e i capelli. Il rilievo dell'oggetto è stato molto difficoltoso, richiedendo numerosi punti di presa e un approfondito intervento di editing soprattutto nello spazio vuoto presente sotto il braccio sinistro, in parte coperto dalla veste.</p> <p>Superficie: lucida e policroma.</p> <p>Misure: 16,9 x 8,6 x 6,4 cm.</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>135 immagini con ZScan Micro (45 triplette).</p> <p>Tempi di rilievo: 38 minuti.</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 44 minuti.</p> <p>Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>59 immagini scattate con SfM.</p> <p>Tempi di rilievo: 20 minuti;</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 28 minuti</p> <p>Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Rilievo 3D scanner	<p>36 scansioni acquisite con 3D scanner.</p> <p>Tempo di acquisizione: 17 minuti; tempo per l'elaborazione del modello: 37 minuti.</p>
Modello	<p>Volume: 38,896 cm³</p> <p>Vertici: 565.414</p>

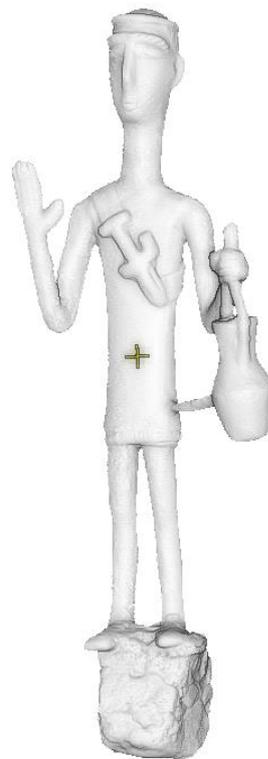
	Triangoli: 1.130.600
Immagine	
Mesh	

Reperto	Offerente con brocca (8)
Descrizione	<p>Il personaggio rappresentato porta un'olla a collo cilindrico sorretta da una corda nella mano sinistra, il pugnale al petto, una corta veste con gonnellino, un copricapo a calotta e la mano destra alzata. I lineamenti del viso sono ben definiti e le sopracciglia molto evidenti. Tra la brocca e il corpo è presente un canale di fusione che non è stato eliminato. La presenza della brocca e del canale di fusione ha complicato il rilievo rendendo necessari più punti di presa.</p> <p>Superficie: opaca e policroma.</p> <p>Misure: 15,1 x 35,6 x 2,9 cm.</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>123 immagini con ZScan Micro (41 triplette).</p> <p>Tempi di rilievo: 36 minuti.</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 41 minuti.</p> <p>Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>62 immagini scattate con SfM.</p> <p>Tempi di rilievo: 21 minuti;</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 29 minuti</p> <p>Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Rilievo 3D scanner	<p>32 scansioni acquisite con 3D scanner.</p> <p>Tempo di acquisizione: 16 minuti; tempo per l'elaborazione del modello: 33 minuti.</p>
Modello	<p>Volume: 27,289 cm³</p> <p>Vertici: 688.217</p> <p>Triangoli: 1.375.747</p>

Immagine



Mesh

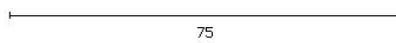
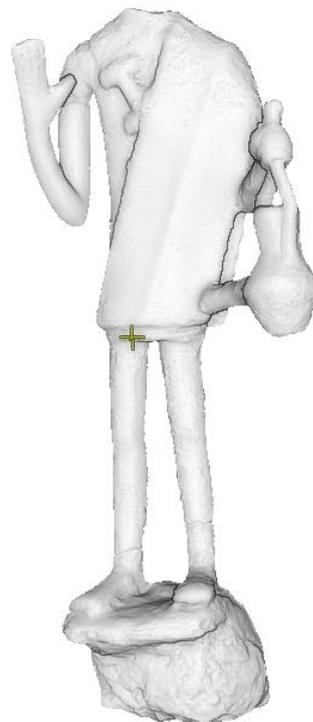


Reperto	Offerente con brocca e veste (9)
Descrizione	<p>Il secondo offerente con olla è acefalo e, a differenza del primo, porta un mantello che copre una parte del corpo. Anche in questo caso il canale di fusione presente tra la brocca e il corpo ha complicato le operazioni di rilievo, semplificato però da una superficie non restaurata, quindi opaca e policroma.</p> <p>Superficie: opaca e policroma.</p> <p>Misure: 11,6 x 59,3 x 3,5 cm.</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>108 immagini con ZScan Micro (36 triplette).</p> <p>Tempi di rilievo: 34 minuti.</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 41 minuti.</p> <p>Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>56 immagini scattate con SfM.</p> <p>Tempi di rilievo: 18 minuti;</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 28 minuti</p> <p>Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Rilievo 3D scanner	<p>32 scansioni acquisite con 3D scanner.</p> <p>Tempo di acquisizione: 14 minuti; tempo per l'elaborazione del modello: 30 minuti.</p>
Modello	<p>Volume: 40,545 cm³</p> <p>Vertici: 849.205</p> <p>Triangoli: 1.698.418</p>

Immagine



Mesh



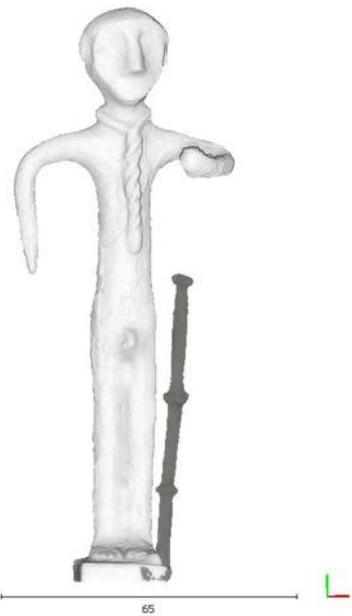
Reperto	Sacerdotessa (10)
Descrizione	<p>La scultura rappresenta una sacerdotessa con la mano destra alzata, dei pendagli su entrambi gli avambracci (sette per parte), una fiaccola o una candela nella mano sinistra, che è stata rilevata separatamente, un lungo mantello che lascia in vista il corpo, ricoperto da una tunica e rappresentato in maniera stilizzata. I tratti del volto, i capelli, le dita e il mantello sono modellati con grande cura. La superficie dell'oggetto è scura e lucida, ma la sua uniformità ha consentito di ottenere delle buone nuvole di punti con tutti gli strumenti a disposizione. Le nuvole ottenute con 3D scanner risultano ancora una volta di qualità superiore. Il rilievo ha richiesto numerosi punti di presa ma non è stato particolarmente complesso.</p> <p>Superficie: lucida e monocroma.</p> <p>Misure: 14,4 x 60,7 x 3,2 cm.</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>126 immagini con ZScan Micro (42 triplete).</p> <p>Tempi di rilievo: 38 minuti.</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 49 minuti.</p> <p>Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>67 immagini scattate con SfM.</p> <p>Tempi di rilievo: 25 minuti;</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 34 minuti</p> <p>Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Rilievo 3D scanner	<p>42 scansioni acquisite con 3D scanner.</p> <p>Tempo di acquisizione: 20 minuti; tempo per l'elaborazione del modello: 38 minuti.</p>

Modello	Volume: 22,8 + 1,1 cm ³ Vertici: 915.164 + 64.822 Triangoli: 1.830.328 + 123.617
Immagine	
Mesh	

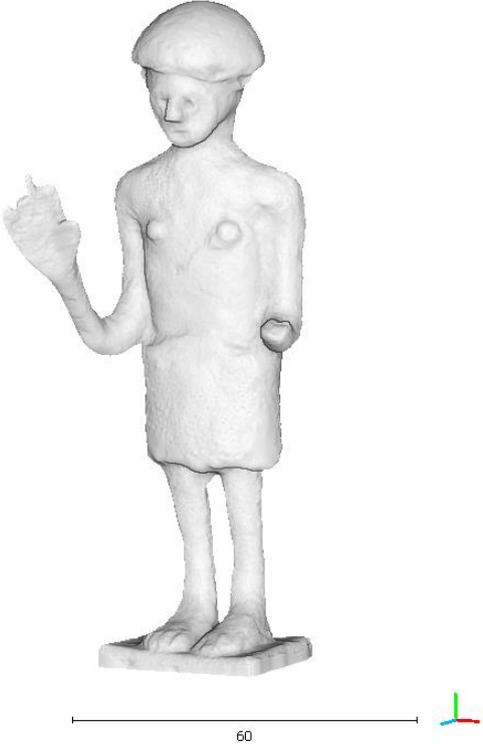
Reperto	Sacerdotessa (11)
Descrizione	<p>Il personaggio è rappresentato con le medesime fattezze della precedente sacerdotessa: mano destra (mancante) alzata, mano sinistra che porta una fiaccola, pendagli sugli avambracci (sette per parte), mantello, tratti del volto, capelli e dita ben definite, superficie molto lucida e uniforme. Presenta alla base la colata per il posizionamento su un supporto. Anche il rilievo, che ha necessitato di numerosi punti di presa, è stato completato con tutti gli strumenti e, similmente al caso precedente, è stato ottenuto un risultato migliore con lo scanner ottico.</p> <p>Superficie: lucida e monocroma.</p> <p>Misure: 13,8 x 6,4 x 4,2 cm.</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>117 immagini con ZScan Micro (39 triplette). Tempi di rilievo: 36 minuti. Tempo per l'elaborazione del modello: 45 minuti. Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>62 immagini scattate con SfM. Tempi di rilievo: 24 minuti; Tempo per l'elaborazione del modello: 31 minuti Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Rilievo 3D scanner	<p>42 scansioni acquisite con 3D scanner. Tempo di acquisizione: 17 minuti; tempo per l'elaborazione del modello: 32 minuti.</p>
Modello	<p>Volume: 20,2 + 8,1 cm³ Vertici: 954.502 Triangoli: 1.669.444</p>

<p>Immagine</p>	
<p>Mesh</p>	

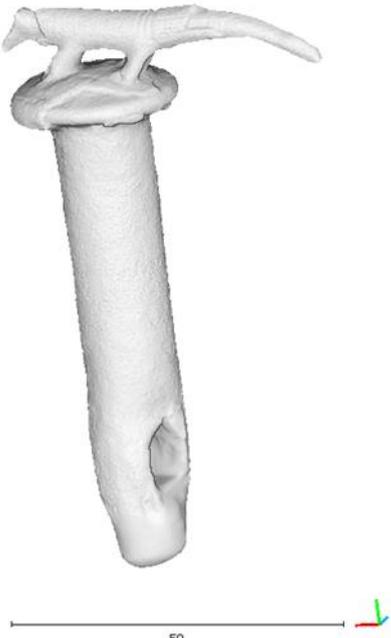
Reperto	Siro-Palestinese (12)
Descrizione	<p>La figura stante, di sesso maschile, è stata interpretata come rappresentazione di una divinità. Indossa esclusivamente un copricapo a calotta e una collana ritorta che discende sul petto. Gli occhi sono affossati, il naso e il mento ben evidenti. Il braccio destro è spezzato all'estremità e piegato verso il basso, quello sinistro regge un bastone con tre noduli discoidali. Le gambe sono unite, le dita dei piedi ben rappresentate, il sesso realizzato con una protuberanza. Il rilievo è stato eseguito con non poche difficoltà a causa dei numerosi coni d'ombra, ma completato con tutti gli strumenti. (FOIS 2015).</p> <p>Superficie: lucida e policroma.</p> <p>Misure: 12,2 x 4,8 x 2,7 cm.</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>153 immagini con ZScan Micro (51 triplette).</p> <p>Tempi di rilievo: 45 minuti.</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 58 minuti.</p> <p>Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>72 immagini scattate con SfM.</p> <p>Tempi di rilievo: 28 minuti;</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 39 minuti</p> <p>Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Rilievo 3D scanner	<p>48 scansioni acquisite con 3D scanner.</p> <p>Tempo di acquisizione: 20 minuti; tempo per l'elaborazione del modello: 46 minuti.</p>
Modello	<p>Volume: 19,125 cm³</p> <p>Vertici: 391.564</p> <p>Triangoli: 783.128</p>

<p>Immagine</p>	
<p>Mesh</p>	

Reperto	Orante (13)
Descrizione	<p>Il personaggio è rappresentato stante, con la mano destra alzata in segno di preghiera e sproporzionata rispetto al corpo. Il copricapo è a calotta, gli occhi e la bocca realizzati con piccole fossette e il naso triangolare. Il busto presenta mammelle sporgenti e il vestiario è costituito da un gonnellino. L'avambraccio destro, con cui probabilmente portava un'offerta, è spezzato. Nonostante un restauro molto approfondito la superficie risulta non troppo lucida, consentendo un rilievo completo sia con 3D scanner che con strumentazione fotogrammetrica. Il volume della figura e il suo protendersi nelle tre dimensioni ha reso necessario l'utilizzo di un gran numero di punti di presa. (MERELLA 2015).</p> <p>Superficie: lucida e policroma.</p> <p>Misure: 11,4 x 3.9 x 4,7 cm.</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>192 immagini con ZScan Micro (64 triplete).</p> <p>Tempi di rilievo: 48 minuti.</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 57 minuti.</p> <p>Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>78 immagini scattate con SfM.</p> <p>Tempi di rilievo: 29 minuti;</p> <p>Tempo per l'elaborazione del modello: 42 minuti</p> <p>Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Rilievo 3D scanner	<p>44 scansioni acquisite con 3D scanner.</p> <p>Tempo di acquisizione: 23 minuti; tempo per l'elaborazione del modello: 42 minuti.</p>

Modello	Volume: 28,236 cm ³ Vertici: 667.539 Triangoli: 1.335.078
Immagine	
Mesh	

Reperto	Acciarino di carro (14)
Descrizione	<p>L'oggetto ha sezione circolare, con l'estremità inferiore arrotondata e un foro di forma ovale per l'inserimento della coppiglia. La parte superiore ha una capocchia circolare sormontata dalla rappresentazione di un piccolo quadrupede, forse una volpe, in posizione vigile; l'oggetto ha tracce di decorazione a rappresentare la pelliccia e le dita (FOIS 2015).</p> <p>La superficie opaca dell'oggetto ha consentito di eseguire un rilievo lineare con tutte le tecniche utilizzate. Particolare attenzione è stata richiesta per il rilievo dell'animale e dei tratti decorati, con riprese ravvicinate.</p> <p>Superficie: parzialmente opaca e policroma.</p> <p>Misure: 8,8 x 4,9 x 2,5 cm.</p>
Rilievo ZScan Micro	<p>135 immagini con ZScan Micro (45 triplette). Tempi di rilievo: 45 minuti. Tempo per l'elaborazione del modello: 55 minuti. Software: ZScan Micro; Zscan; CloudCompare</p>
Rilievo SfM	<p>67 immagini scattate con SfM. Tempi di rilievo: 22 minuti; Tempo per l'elaborazione del modello: 35 minuti Software: Agisoft Metashape; CloudCompare</p>
Rilievo 3D scanner	<p>25 scansioni acquisite con 3D scanner. Tempo di acquisizione: 12 minuti; tempo per l'elaborazione del modello: 32 minuti.</p>
Modello	<p>Volume: 13,925 cm³ Vertici: 359.574</p>

	Triangoli: 719.156
Immagine	
Mesh	

L'elaborazione dei dati

È opportuno precisare che 3D scanner a luce strutturata più recenti e performanti, presenti sul mercato a costi oramai accessibili, consentono un allineamento automatico o semiautomatico delle scansioni o dei modelli acquisiti, garantendo un ottimo risultato e un ulteriore risparmio di tempo. Anche in questo caso il software utilizzato per l'allineamento delle scansioni è stato CloudCompare.

Dalla tabella di riepilogo si desume che il metodo di acquisizione più rapido è quello con 3D scanner, con una media di 19 minuti, a seguire il rilievo fotogrammetrico, 24 minuti, e per ultimo il rilievo con ZScan Micro, 45 minuti. Per quanto riguarda l'ottenimento del modello 3D scanner e SfM hanno tempi di elaborazione che quasi si equivalgono (rispettivamente 38 minuti e 37 minuti), ZScan Micro ha richiesto tempi decisamente più lunghi, mediamente 58 minuti, dovuti in gran parte alla generazione delle nuvole di punti.

Come spesso accade nel rilievo, gli oggetti morfologicamente più complessi sono quelli che richiedono un maggior numero di punti di presa. Se la complessità delle forme incide pesantemente sia sulla tempistica del rilievo che sull'elaborazione, soprattutto a causa dei numerosi coni d'ombra che si vengono a formare, la qualità delle nuvole di punti viene fortemente influenzata anche dal colore e dalla riflettività dell'oggetto. Le condizioni delle superfici dei quattordici bronzi oggetto dello studio hanno caratteri decisamente differenti sotto questo punto di vista. Alcuni di essi sono stati oggetto di una pulizia e di un restauro molto approfondito, che ha reso le superfici molto lucide e monocrome, mettendone in evidenza i caratteri decorativi; altri hanno subito una pulizia meno approfondita, con alcune patine superficiali ancora ben visibili e dalle tonalità di colore più variegate. La monocromia e la lucentezza del bronzo hanno reso più difficoltoso il rilievo, sia con gli strumenti fotogrammetrici che con il 3D scanner: in entrambi i casi, infatti, la luce utilizzata per illuminare gli oggetti, sia quella proveniente dalle lampade a LED che dal proiettore a luce strutturata, ha provocato dei riflessi difficili da gestire e visibili talvolta solo in fase di elaborazione dei dati (per un confronto si veda GIACALONE 2015). Poiché

lo scanner a luce strutturata mostra un'anteprima della nuvola di punti, la correzione della luminosità del proiettore è avvenuta fin dalle prime scansioni, mentre per la camera metrica ci si è resi conto di questa necessità solo dopo aver elaborato le immagini. Questo limite della strumentazione, che è proprio anche dei 3D scanner a tempo di volo e a differenza di fase, in altri casi può essere superato con l'utilizzo di materiali opacizzanti; sui bronzi, per ovvie questioni di tutela, non è stato possibile utilizzare questo metodo. Le superfici non restaurate, più opache e con diverse tonalità di colore, sono state rilevate in maniera più speditiva. Da un confronto tra le varie nuvole di punti è emerso che la qualità del rilievo con 3D scanner ottico è nettamente superiore anche in quei casi in cui la lucentezza della superficie ha messo a dura prova la tecnica di acquisizione; alcune nuvole rilevate sia con SfM che con ZScan (ricordiamo che la fotocamera e le ottiche sono le medesime) sono risultate lacunose e i modelli hanno necessitato di interventi di *editing* per compensare le mancanze. Ne consegue che il tempo risparmiato in fase di acquisizione è stato poi utilizzato in fase di elaborazione, senza riuscire a raggiungere il livello di qualità e precisione dello scanner a luce strutturata. Vista la finalità e l'eccezionalità dei reperti oggetto del rilievo si consiglia in questi casi l'utilizzo di 3D scanner di alta qualità, che hanno sicuramente un costo elevato ma garantiscono un risultato apprezzabile.

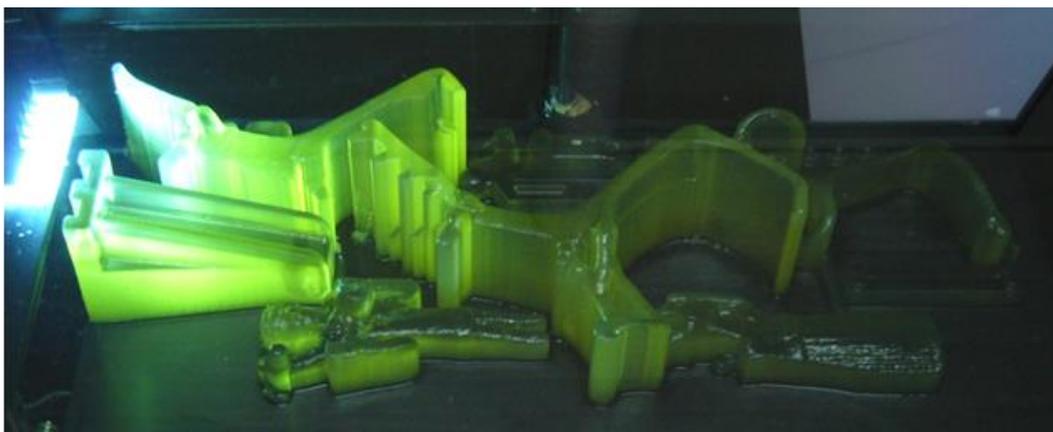


Fig. 38 - Copie dei bronzi in fase di prototipazione.

I modelli elaborati sono stati oggetto di prototipazione con resine sintetiche di alta qualità, che hanno consentito la stampa di modelli in scala 1:1 dei bronzi e di tutte le loro parti non ancora integrate, con una successiva colorazione da parte dei restauratori e l'ottenimento di un ottimo risultato. Le scansioni acquisite potrebbero essere utilizzate per la prototipazione di nuove copie, da destinare a nuove esposizioni, a percorsi tattili o a sperimentazioni di fusione dei bronzi. La conservazione e il riuso dei modelli è un fattore importante e da prendere in forte considerazione (D'ANDREA *ET ALII* 2020).

La stampa a getto di resina, conosciuta anche come stereolitografia (SLA), è una tecnologia avanzata di stampa 3D che ha rivoluzionato il modo in cui si progettano e producono oggetti tridimensionali. Questa tecnica, nata negli anni '80, si è evoluta nel corso degli anni, diventando una delle opzioni preferite per la creazione di prototipi e componenti morfologicamente complessi. Uno dei principali vantaggi della stampa a getto di resina risiede nella sua capacità di produrre oggetti dettagliati e complessi con una precisione eccezionale. La tecnologia si basa su un processo di fotopolimerizzazione, in cui uno strato sottile di resina liquida viene solidificato da una fonte di luce ultravioletta. Questo avviene strato dopo strato, fino a creare l'oggetto desiderato. Un elemento chiave della stampa a getto di resina è la resina stessa. Questi materiali polimerici possono variare in composizione e proprietà, consentendo agli utenti di selezionare la formula più adatta alle loro esigenze specifiche. Le resine possono essere trasparenti, opache, flessibili o rigide, offrendo una gamma di opzioni che si adattano a diversi settori, come l'ingegneria, la medicina e il design. In termini di precisione, la stampa a getto di resina è notevolmente superiore ad altre tecnologie di stampa 3D, come la fusione di filamenti (FDM). Questo rende la SLA ideale per la produzione di prototipi in ambiti in cui la precisione è fondamentale, come l'industria aerospaziale e automobilistica. La capacità di catturare dettagli fini e geometrie complesse rende questa tecnologia un'opzione preferita per la realizzazione di parti intricatamente progettate. Un altro aspetto cruciale della stampa a getto di resina è la velocità di produzione. Rispetto ad alcune alternative, come la sinterizzazione laser selettiva (SLS), la SLA è spesso più rapida, consentendo una produzione più efficiente e tempi di

consegna più rapidi. Questa caratteristica fa sì che la tecnologia sia particolarmente attraente per coloro che cercano di ridurre i tempi di sviluppo e portare rapidamente i loro prodotti sul mercato. Tuttavia, nonostante i numerosi vantaggi, la stampa a getto di resina non è esente da sfide. Una delle principali è il costo dei materiali. Le resine specializzate possono essere costose, rendendo questa tecnologia meno accessibile per alcuni utenti. Inoltre, la necessità di attrezzature specifiche, come le stampanti SLA, può rappresentare un investimento iniziale significativo. Un altro aspetto da considerare è la gestione delle resine e il loro indubbio impatto ambientale. Alcune resine possono contenere sostanze chimiche nocive, e il processo di smaltimento può rappresentare una sfida ecologica. Tuttavia, gli sviluppi continui nella ricerca di materiali più sostenibili stanno cercando di affrontare questo problema, aprendo la strada a una stampa a getto di resina più ecologica (ROSACE ET ALII 2021; www.stampa3d-forum.it; www.binarioprint.it).



Fig. 39 - Copie dei bronzi in resina al termine della procedura di stampa e di rimozione della resina di supporto.

Resumen Capítulo 6: El levantamiento de los hallazgos arqueológicos

El levantamiento de los hallazgos arqueológicos es fundamental para el estudio y la divulgación científica de la información. El dibujo del hallazgo debe ser claro, preciso y resaltar sus características principales, como el estado de conservación y la presencia de elementos decorativos. Tradicionalmente, el dibujo es subjetivo y depende de las habilidades interpretativas del dibujante, pero en los últimos veinte años la tecnología ha permitido obtener datos más objetivos, gracias a la fotografía digital, fotogrametría digital, escáner láser 3D y *software* CAD dedicados. La variedad de objetos para representar gráficamente es amplia, desde artefactos de cerámica hasta hallazgos líticos, de madera, óseos y metálicos, tanto íntegros como fragmentarios. Sin embargo, la subjetividad de los datos se introduce cuando el dibujante decide interpretar algunos elementos sobre otros, como excluir signos de desgaste de la superficie o calcular la inclinación de un fragmento. Las nuevas tecnologías como los escáneres 3D y las técnicas fotogramétricas ofrecen ventajas significativas, como la posibilidad de adquirir texturas para obtener modelos 3D fotorrealistas con detalles precisos. Esto conduce a una mayor precisión de los datos en comparación con el levantamiento manual y permite una representación gráfica más completa y precisa de los objetos arqueológicos. Se presentan dos casos de estudio, uno sobre vasijas miniaturísticas y otro sobre bronce figurados nurágicos. Las técnicas de levantamiento y los objetivos son diferentes: en el primer caso, el levantamiento está destinado al estudio y la publicación de los datos con una representación tradicional en 2D utilizando CAD, mientras que en el segundo caso está destinado a la creación de prototipos de los bronce para exposiciones museísticas. El levantamiento de las vasijas miniaturísticas provenientes de la sepultura de Corti Beccia en Sanluri, destaca cómo el progreso tecnológico ha revolucionado la forma en que los hallazgos en cerámica son levantados y representados gráficamente, permitiendo una mayor precisión y completitud de los datos, así como nuevas posibilidades para el estudio y la divulgación científica. Se comparan las diferentes técnicas de levantamiento tridimensional y su aplicación en la representación gráfica. Los modelos tridimensionales obtenidos pueden ser compartidos en varios formatos para extraer vistas y secciones del objeto. El alineamiento de los modelos y la verificación de las discrepancias se realizaron

utilizando el *software de open source* CloudCompare, demostrando un buen nivel de precisión en todos los casos. Sin embargo, surgieron diferencias significativas en el rendimiento y los requisitos de los sistemas utilizados. La consideración de los costes y la conveniencia del equipamiento es esencial en la evaluación de las opciones disponibles. El segundo caso de estudio se refiere al levantamiento de 14 estatuillas de bronce encontradas en los sitios de Santu Antinu (Genoni) y Domu de Orgia (Esterzili), destinado a la creación de prototipos. Dado que las directrices ministeriales desaconsejan el uso de moldes directos o técnicas de levantamiento de contacto en estos artefactos, fue necesario utilizar un levantamiento indirecto. Se describen las operaciones de levantamiento utilizando tres tecnologías diferentes: sistema ZScan Micro, fotogrametría digital (SfM) y escáner 3D de luz estructurada. Las técnicas se comparan en términos de velocidad de adquisición y procesamiento de datos. Se destacan los problemas encontrados durante el levantamiento, como la gestión de reflejos y variaciones de color y la reflectividad de las superficies de los bronce, que afectan su calidad.

7. Il rilievo dei siti archeologici

Si presentano di seguito lavori di rilievo finalizzati a operazioni di documentazione di due cantieri di restauro e scavo archeologico.

7.1. Caso di studio: il rilievo 3D finalizzato allo smontaggio e rimontaggio di una sepoltura eneolitica

Tra i vari usi che si possono fare dei rilievi tridimensionali ottenuti da 3D scanner o da rilievo topografico e fotogrammetrico, vi è sicuramente la possibilità di sfruttare la grande mole di dati ottenuta e l'elevato livello di qualità e precisione per lo smontaggio e rimontaggio di beni archeologici immobili, finalizzato al restauro di porzioni di edifici o allo spostamento del bene per questioni di tutela e valorizzazione. Il caso di studio che si presenta descrive le operazioni di rilievo, smontaggio e rimontaggio della sepoltura eneolitica rinvenuta e indagata stratigraficamente in località Corti Beccia a Sanluri, precedentemente descritta nel capitolo 4.1.1. La sepoltura, infatti, doveva essere rimossa per poter restituire l'area precedentemente occupata per i lavori di scavo archeologico al legittimo proprietario. Inoltre, vista l'impossibilità di rendere fruibile in loco l'importante ritrovamento, si decise di rimontarla immediatamente nei locali dell'ex Regio Museo Archeologico Nazionale di Cagliari, per consentirne sia la tutela che la valorizzazione.

Il rilievo

Il rilievo archeologico in ambienti sotterranei, parzialmente interrati o in tomba, è sempre stato particolarmente difficoltoso da eseguire con i metodi tradizionali, soprattutto a causa delle condizioni ambientali (luminosità, umidità, etc.), degli spazi ristretti e di una libertà di movimento limitata. Queste caratteristiche rappresentano un problema anche per il rilevatore che utilizzi 3D scanner o

strumentazione fotogrammetrica: l'ottenimento di un buon risultato con una mole di lavoro congrua alle finalità del rilievo e con costi sostenibili dipendono molto dalla scelta dello strumento e della tecnica più adatta. In questo caso è stato possibile confrontare tre tecniche di rilievo: un 3D laser scanner terrestre, il sistema ZScan e il sistema SfM. Poiché la sepoltura doveva essere smontata e rimontata una delle operazioni propedeutiche al rilievo è stata la numerazione di ogni singolo elemento costruttivo, dalle lastre più voluminose fino alle zeppe più piccole, utilizzate per dare stabilità alle pareti interrato. Sono stati numerati, fotografati e posizionati anche gli elementi costruttivi non più in opera ritrovati nei pressi della sepoltura, per un totale di 134 elementi litici. La numerazione è avvenuta a seguito di un accurata spolveratura della superficie e con l'applicazione di cartellini in polionda (polipropilene alveolare) di colore bianco, con il numero scritto con inchiostro indelebile e ricoperto con vernice protettiva, in modo tale da rendere l'indicazione del numero ben visibile e resistente, per un breve periodo, alle eventuali intemperie (Fig. 40).



Fig. 40 - Corti Beccia (Sanluri): blocchi numerati ancora in opera.

Il rilievo con 3D scanner terrestre è avvenuto posizionando lo strumento attorno alla sepoltura (4 stazioni di presa) e all'interno di essa (2 stazioni), impostando una risoluzione finalizzata all'ottenimento di una maglia di punti di circa 2 mm, che permettesse di riconoscere nella nuvola di punti anche le pietre più piccole e, in alcuni casi, di leggere il numero progressivo assegnato ai singoli elementi costruttivi. Visto l'esiguo numero delle scansioni e le vaste aree di sovrapposizione dovute alla modesta estensione dell'area, il rilievo e l'allineamento delle nuvole di punti sono avvenuti senza l'utilizzo di target o altri punti di riferimento esterni, ma semplicemente con il riconoscimento manuale di alcuni dei numerosi punti in comune. Tale operazione ha consentito di acquisire i dati molto velocemente, senza doversi preoccupare della visibilità dei target, evitando inutili perdite di tempo che avrebbero potuto favorire differenze di luminosità tra le varie nuvole di punti. Il risultato è stato l'ottenimento di una nuvola di punti a colori composta da circa 5.000.000 di vertici. Il rilievo ha richiesto circa 15 minuti per ogni stazione, per un totale di 90 minuti; allineamento, colorazione, filtraggio dei dati circa due ore di elaborazione (Fig. 41).



Fig. 41 - Corti Beccia (Sanluri): rilievo della sepoltura con 3D laser scanner TOF.

Il rilievo con ZScan è avvenuto con l'utilizzo di un'ottica fissa da 24 mm, con 31 punti di stazione, per un totale di 93 immagini e 31 triplette elaborate; la conformazione della sepoltura ha consentito di rilevarla completamente dall'esterno. Per l'acquisizione delle immagini è stato necessario attendere un momento della giornata in cui la luce fosse uniforme, in modo tale che non vi fossero ombre proiettate sulla superficie. Il risultato è stato una nuvola di punti di 7.188.604 di vertici. Delle 31 scansioni ottenute, necessarie per avere un buon allineamento grazie alle vaste aree di sovrapposizione, ne sono state utilizzate soltanto 11 nel modello finale, per un totale di 2.737.788 vertici. A seguito dell'eliminazione manuale dei punti in eccesso con gli strumenti di ritaglio e del filtraggio spaziale delle aree di sovrapposizione è stato ottenuto un modello di 1.674.129 vertici, quelli effettivamente utili alle finalità del lavoro. Il rilievo ha avuto una durata di 80 minuti: nonostante l'elevato numero di stazioni gli spostamenti della strumentazione (treppiede con barra graduata e fotocamera) sono stati abbastanza agevoli e veloci; l'acquisizione della tripletta è avvenuta in pochi secondi e gran parte del tempo tra uno scatto e l'altro è stato utilizzato dall'operatore per valutare il miglior punto di presa. L'elaborazione delle nuvole di punti dalle triplette è, al contrario, un'operazione molto più macchinosa e dipende dalla risoluzione prescelta. In questo caso (con una maglia prevista di 1 punto ogni 40 pixel, corrispondente a una maglia di 3 mm per singola acquisizione) il calcolo delle nuvole di punti ha richiesto 40 minuti sul software ZScan, comprensivo del tempo necessario all'esportazione dei dati. L'allineamento delle nuvole di punti e le operazioni di ritaglio e filtraggio eseguite con CloudCompare hanno richiesto 60 minuti (Fig. 44).

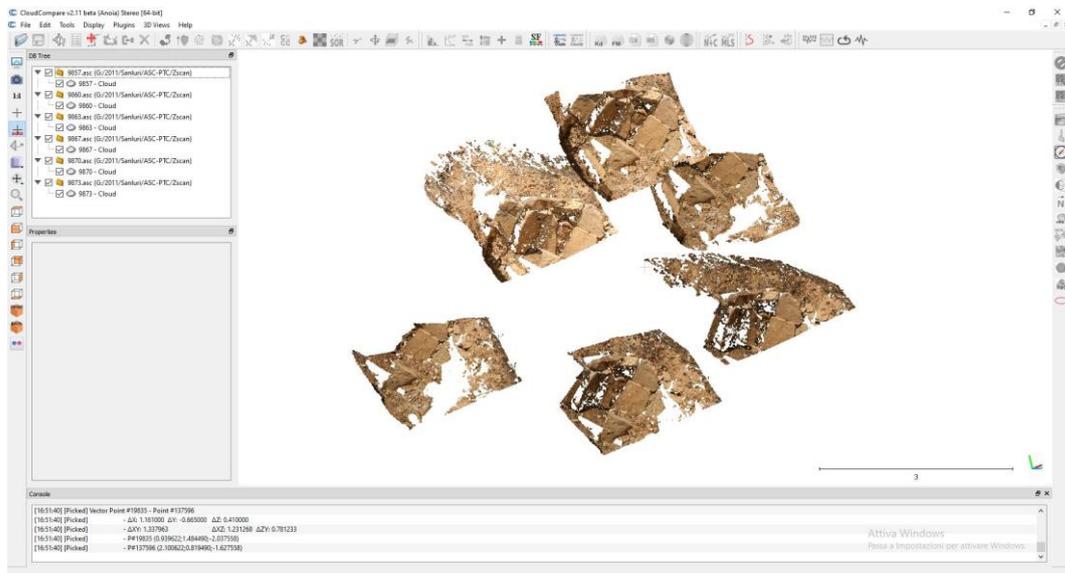


Fig. 42 - Corti Beccia (Sanluri): nuvole di punti acquisite con ZScan prima dell'allineamento.

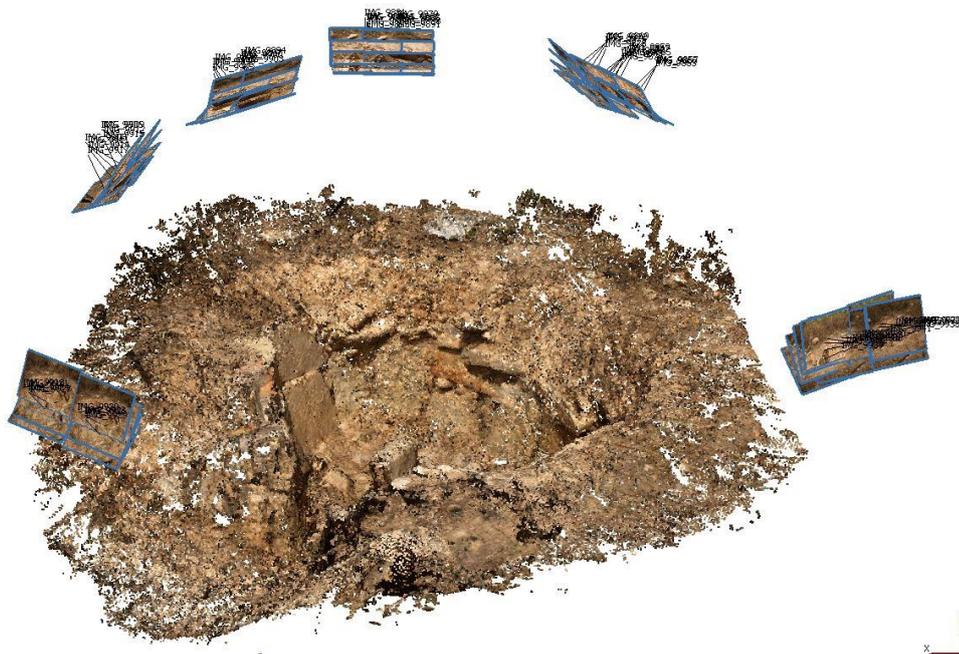


Fig. 43 - Punti di presa utilizzati per il rilievo della sepoltura.

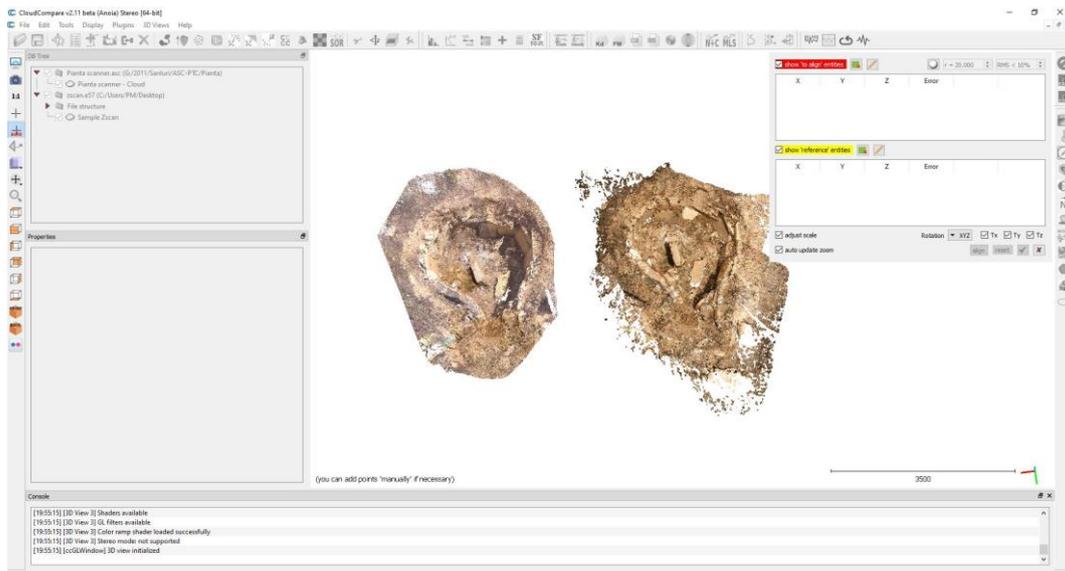


Fig. 44 - Allineamento delle nuvole su CloudCompare utilizzando il rilievo 3D scanner come riferimento metrico.

Il rilievo con SfM, eseguito con camera terrestre ma che si sarebbe potuto eseguire anche con drone, è stato molto veloce (20 minuti per il rilievo sul campo). L'elaborazione di nuvola, mesh e modello texturizzato con Agisoft Metashape è avvenuta con un totale di 35 minuti. La rapidità di esecuzione ed elaborazione è dovuta anche al fatto che non sono stati utilizzati riferimenti di alcun genere (*target*, *stadie*, etc.), poiché il modello è stato scalato in fase di allineamento con la nuvola di punti ottenuta da 3D scanner (Figg. 43, 44).

Per l'elaborazione con Agisoft Metashape sono state utilizzate le stesse immagini rilevate con ZScan, ovvero con la medesima fotocamera e obiettivo posizionati su un treppiede molto stabile, ma non è stato necessario utilizzare l'intera tripletta. Delle 93 immagini acquisite ne sono state sufficienti due su tre, quindi 62. Del modello ottenuto (costituito da 11.662 vertici e 22.578 facce) è stata elaborata anche una mesh *texturizzata*, molto utile per il riconoscimento delle singole pietre in fase di rimontaggio. Le nuvole di punti ottenute sono state allineate con il software CloudCompare. L'allineamento del rilievo proveniente da 3D scanner e di quello ottenuto con ZScan, trattandosi di due sistemi che non necessitano di riferimenti esterni, è avvenuto senza scalare il secondo modello, ovvero utilizzando le misure presenti nella nuvola. Per quanto riguarda il

modello ottenuto con Agisoft Metashape il fattore di scala è stato ottenuto direttamente dalle misure rilevate con 3D scanner. In entrambi i casi il livello di sovrapposizione è molto buono, con discostamenti delle linee di sezione inferiori al centimetro, una precisione più che sufficiente viste le finalità del lavoro. Il rilievo è stato completato con l'acquisizione di numerose immagini di dettaglio di ogni singola pietra, prima durante e dopo la rimozione, per semplificarne il riconoscimento e la catalogazione. Al termine della rimozione degli elementi lapidei è stata eseguita un'ultima scansione all'interno della buca lasciata dalla sepoltura; la restituzione grafica del negativo dell'opera è stata utilizzata per ricreare un alloggiamento di dimensioni e forma idonei nella nuova sede della sepoltura.



Fig. 45 - Corti Beccia (Sanluri): rimozione delle pietre numerate e documentazione fotografica.

Prima di eseguire qualsiasi altra operazione, soprattutto il definitivo smontaggio dell'opera, sono stati prodotti tutti gli elaborati necessari alle successive lavorazioni. Le nuvole di punti sono state importate su CAD e inserite in una quadrettatura, poi ricostruita sul terreno, con riferimenti sia in pianta che in

quota, in modo tale da utilizzare le coordinate note per riposizionare gli elementi di costruzione e da avere l'inclinazione e la rotazione corrette (Fig. 50). Il trasporto del materiale lapideo è avvenuto utilizzando teli e cuscinetti in gommapiuma che evitassero danni alle pietre; alcuni elementi che in fase di rilievo sembravano integri si sono in realtà rivelati fratturati in fase di asportazione; questi materiali sono stati ricomposti dai restauratori della Soprintendenza (Fig. 46) prima del loro riposizionamento nella sede definitiva³⁵.



Fig. 46 - Corti Beccia (Sanluri): restauro degli elementi lapidei prima del posizionamento.

³⁵ Si ringrazia, in particolare, il restauratore Sergio Orrù della Soprintendenza Archeologica per le province di Cagliari e Oristano per il lavoro svolto.



Fig. 47 -- Corti Beccia (Sanluri): scavo della fossa e realizzazione del vespaio.

La buca per il riposizionamento della sepoltura è stata scavata nel terreno all'interno del cortile dell'ex Regio Museo Archeologico, utilizzando i riferimenti precedentemente riportati al suolo. Alla base della buca, per favorire il deflusso delle acque piovane, è stato realizzato un vespaio alto circa 30 cm, poi ricoperto da uno strato di ghiaia dello spessore di circa 15 cm (Fig. 47). Le pareti sono state ben ripulite dalle radici e consolidate con un doppio strato di malta, realizzata con calce idraulica, acqua di calce, sabbia e terreno setacciato proveniente dallo scavo della sepoltura. Il primo strato di malta è stato spruzzato sulle pareti per ricoprire completamente il terreno naturale; il secondo strato è stato disteso utilizzando a supporto una rete porta intonaco in PVC (Fig. 48).



Fig. 48 - Corti Beccia (Sanluri): consolidamento delle pareti.

Completati i lavori di preparazione dell'alloggiamento è iniziata la fase di ricostruzione vera e propria: la strumentazione necessaria era costituita da classici strumenti di lavoro e misurazione analogici (lenze, rotella metrica, stadia, livelle a bolla angolari, piombi) e da stazione totale (utilizzare per picchettare, ovvero per riportare le coordinate sul terreno) e da due PC affiancati, uno utilizzato per dettare all'operatore coordinate e inclinazione derivanti dalle nuvole di punti ottenute con 3D scanner e ZScan, entrambe molto precise e affidabili, l'altro per avere il confronto fotorealistico con il modello realizzato con SfM, molto più dettagliato e utile al riconoscimento delle pietre (Fig. 49). Il solo riposizionamento dei singoli elementi di costruzione ha richiesto dieci giornate di lavoro: le pietre riposizionate sono state circa 13 al giorno.



Fig. 49 - Corti Beccia (Sanluri): verifica della posizione e dell'inclinazione delle pietre.



Fig. 50 - Corti Beccia (Sanluri): posizionamento delle pietre.



Fig. 51 - Corti Beccia (Sanluri): la sepoltura al termine del rimontaggio.

Per ottenere la giusta pendenza sono state utilizzate pietre di diversa tipologia dalle originali e mattoni, malta (sempre a base di calce idraulica, sabbia e terra) e sostegni temporanei in metallo, legno o materiale plastico. Completato il riposizionamento di tutte le pietre gli spazi sono stati riempiti con la malta e ricoperti con il terreno del sito; il pavimento è stato completato con realizzazione di un battuto di terra (Figg. 50-51). Il lavoro eseguito ha portato a una serie di conclusioni: il rilievo di manufatti di dimensioni contenute come una sepoltura necessita di una nuvola di punti molto precisa, ottenibile sia con 3D scanner che con i sistemi di fotogrammetria digitale, con la differenza che il laser scanner permette di ottenere la nuvola di punti con un'elaborazione molto più rapida e con la certezza della precisione; l'utilizzo della fotogrammetria digitale, da drone o terrestre, permette di ottenere modelli fotorealistici con una qualità dell'immagine decisamente più elevata rispetto alle altre tecnologie, che risulta essere molto utile per il riconoscimento degli elementi costruttivi e per avere sempre a disposizione un modello di riferimento globale; la conoscenza delle tecniche di rilievo e costruzione tradizionali e la manualità degli operatori

coinvolti (archeologi, restauratori, operai specializzati) sono condizioni basilari per la buona riuscita del lavoro. La tecnologia permette di velocizzare, semplificare e migliorare un lavoro che non potrà mai prescindere da una buona conoscenza del lavoro manuale e da una profonda esperienza sul campo.

7.2. Caso di studio: il rilievo 3D finalizzato alla progettazione del restauro di un tempio nuragico.

Negli ultimi decenni, il comune di Esterzili ha dimostrato un impegno costante nella valorizzazione e nella manutenzione delle sue aree archeologiche, testimoniato da progetti attuati a partire dagli anni Novanta del secolo scorso. Uno degli interventi più significativi è stato il restauro del tempio nuragico di Domu de Orgia, situato sul monte Cuccureddi, nei pressi della località Santa Vittoria, luogo in cui furono rinvenuti gli undici bronzi oggetto del caso di studio precedentemente descritto. La struttura presentava un evidente crollo sul lato est del vano centrale, che richiedeva un intervento di ripristino immediato.



Fig. 52 - Il tempio a megaron di Domu de Orgia visto da nord-est in corso del rilievo con 3D laser scanner Menci GS100 prima del restauro.

Il progetto di restauro del tempio ha rappresentato un'opportunità unica per applicare e confrontare diverse tecniche di rilievo tridimensionale. Prima

dell'inizio dei lavori, durante la fase di progettazione, è stato impiegato un 3D laser scanner a tempo di volo (TOF) Menci GS100 per acquisire una rappresentazione dettagliata delle condizioni preesistenti del monumento. Questo strumento avanzato ha consentito di catturare ogni minimo dettaglio della struttura, fornendo una base di riferimento cruciale per la pianificazione dell'intervento. Successivamente, dopo il completamento degli interventi di restauro, è stato utilizzato un 3D scanner a differenza di fase Faro Focus 120 per documentare le modifiche apportate e verificare la riuscita degli interventi. Questa fase ha permesso di valutare in modo accurato il successo del ripristino, evidenziando eventuali differenze tra lo stato iniziale e quello finale del tempio. Le nuvole di punti acquisite sono diventate un prezioso strumento di monitoraggio nel tempo, fondamentale per valutare l'efficacia delle decisioni prese durante il restauro. L'altra metodologia adottata è stata il rilievo aerofotogrammetrico con la tecnica *Structure from Motion* (SfM), eseguito dopo il restauro. Questo approccio ha sfruttato immagini aeree per generare modelli tridimensionali, consentendo una visione globale della struttura e delle sue relazioni con l'ambiente circostante. L'uso di tecnologie aerofotogrammetriche ha aggiunto un ulteriore strato di dettaglio e comprensione alla documentazione del tempio. L'approccio multidisciplinare, combinando dati provenienti da diverse fonti e tecniche, ha permesso una valutazione completa e dettagliata del restauro del tempio nuragico. La convergenza di informazioni provenienti dai rilievi laser a tempo di volo, dagli scanner a differenza di fase e dalle tecnologie aerofotogrammetriche ha fornito un quadro completo dello stato del monumento prima, durante e dopo il restauro. Questo non solo ha facilitato la comprensione delle dinamiche strutturali, ma ha anche aperto la strada a future ricerche e interventi più mirati nella conservazione del patrimonio archeologico di Esterzili. L'intervento di restauro del tempio nuragico di Domu de Orgia ha rappresentato un esempio eccellente di come l'applicazione di tecnologie avanzate di rilievo tridimensionale possa contribuire in modo significativo alla conservazione e alla valorizzazione del patrimonio archeologico. La combinazione di strumenti differenti ha permesso un'analisi approfondita e

multidisciplinare, sottolineando l'importanza di un approccio integrato per garantire la preservazione delle testimonianze storiche per le generazioni future.

Il rilievo prima del restauro

Il rilievo del monumento aveva l'obiettivo di soddisfare una serie di necessità evidenziate dai progettisti. Essi avevano bisogno, in primo luogo, di un'elevata precisione tecnica nella rappresentazione dei dettagli architettonici; strumenti come i laser scanner 3D e i sistemi di fotogrammetria consentono di catturare dettagli millimetrici dell'opera, rivelando eventuali lesioni, deformazioni o alterazioni. Questa precisione era essenziale per una comprensione approfondita delle condizioni dell'oggetto e per guidare gli interventi di restauro in modo mirato. Soddisfare questa necessità non è stato difficile con l'utilizzo dei 3D scanner, le cui nuvole di punti sono servite anche per orientare e scalare in maniera precisa il rilievo fotogrammetrico finale. Le diverse tecniche di rilievo, come la scansione laser, la fotogrammetria e la rilevazione fotogrammetrica aerea, dovevano essere impiegate in sinergia per ottenere una visione completa dell'opera. Ogni metodo offre, infatti, vantaggi specifici: ad esempio, la scansione laser è ideale per dettagli strutturali, mentre la fotogrammetria può catturare l'aspetto estetico e artistico. La combinazione di queste tecniche ha permesso di ottenere una rappresentazione tridimensionale completa e accurata. Il rilievo tridimensionale ha permesso di includere a costi accessibili una documentazione esaustiva e dettagliata sia prima che dopo gli interventi di restauro.

Questo ha permesso di confrontare lo stato iniziale con le modifiche apportate, valutando l'efficacia delle azioni intraprese e garantendo un monitoraggio nel tempo. Le immagini sono state fondamentali per dimostrare l'impatto positivo del restauro e per fini di ricerca futura. In qualsiasi operazione di restauro è necessario rispettare l'autenticità dell'opera e il rilievo tridimensionale, è essenziale da questo punto di vista, poiché offre come risultato una visione oggettiva del dato strutturale. Questo implica l'utilizzo di strumenti e metodologie che non danneggino o alterino il materiale originale.

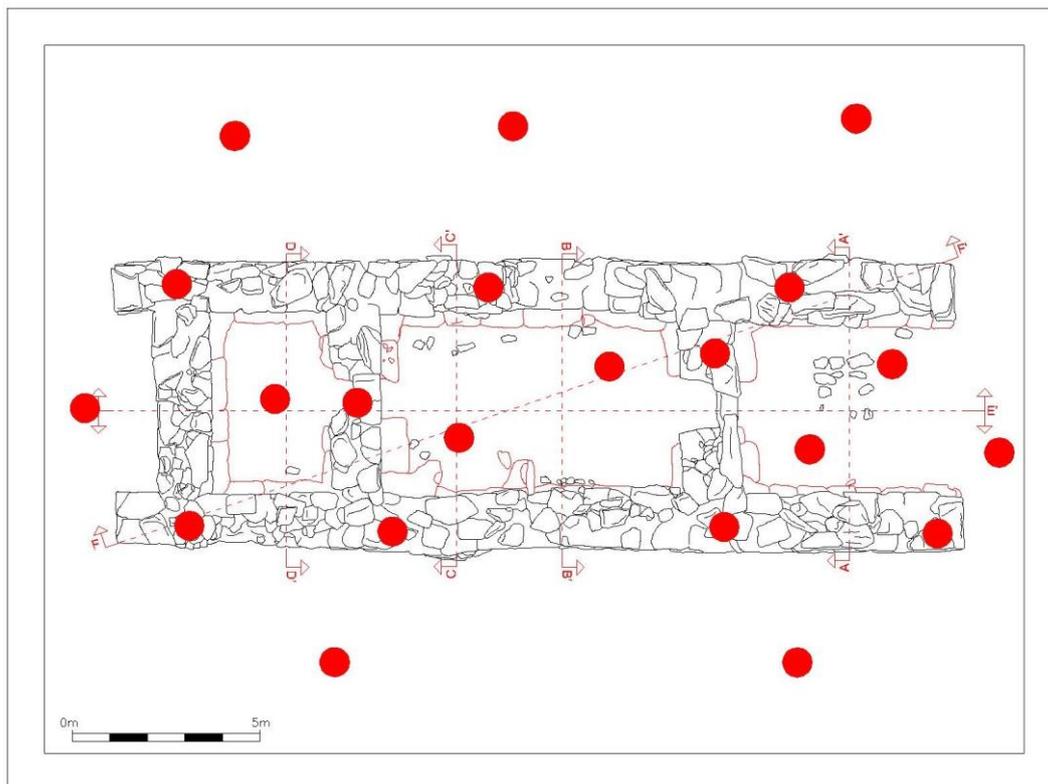


Fig. 53 - Domu de Orgia - Esterzili. Pianta del tempio a megaron dopo la vettorializzazione della nuvola di punti, con indicazione dei punti di stazione del 3D laser scanner.

Il caso di studio mirava anche a sottolineare come la collaborazione tra professionisti di diverse discipline, come restauratori, archeologi, ingegneri ed esperti in tecnologie di rilevamento, è cruciale. Un approccio interdisciplinare consente di integrare diverse prospettive, migliorando la comprensione dell'oggetto e facilitando decisioni informate e condivise durante il processo di restauro. Soddisfare tutte queste necessità richiedeva un equilibrio tra tecnologia avanzata, competenze specialistiche e rispetto per l'unicità dell'opera.

Il rilievo eseguito con il 3D laser scanner Menci GS 100 della Trimble (Time-of-Flight) ha offerto una prospettiva dettagliata e accurata sulla morfologia e sulle condizioni del manufatto. Nel caso specifico, l'approccio adottato ha richiesto la disposizione strategica dello strumento in posizioni varie, sia intorno che sopra il monumento, al fine di ottenere una nuvola di punti completa e priva di "buchi" o ombre indesiderate, comuni quando si rilevano manufatti morfologicamente complessi. La complessità del monumento ha reso necessario

eseguire il rilievo da diverse angolazioni per catturare ogni dettaglio e garantire una visione completa dell'opera (Fig. 53). Sono state stabilite quindici stazioni di presa intorno e all'interno degli ambienti, nove stazioni sopra le murature e una stazione dedicata esclusivamente al collegamento tra le diverse acquisizioni. Questa metodologia ha permesso di ottenere una rappresentazione tridimensionale dettagliata e completa del monumento da molteplici prospettive, assicurando la copertura di ogni area nella nuvola di punti risultante. Per agevolare il processo di registrazione dei dati e accelerare le operazioni complessive, sono stati posizionati ventuno *markers* riflettenti in punti strategici.



Fig. 54 - Marker riflettente posizionato all'interno della struttura.

Questi *markers*, grazie alle loro proprietà riflettenti, hanno facilitato la correlazione tra le diverse acquisizioni, consentendo un allineamento preciso dei dati raccolti dalle diverse stazioni di presa. L'impiego di *markers* riflettenti è risultato particolarmente utile per ottimizzare la precisione del rilievo e garantire

un avanzamento delle attività di rilievo senza soluzione di continuità nella rappresentazione tridimensionale del monumento. L'unico svantaggio dell'utilizzo di *markers* riflettenti è che negli scanner TOF questi necessitano di una scansione dedicata, operazione che richiede circa un minuto per ogni punto di riferimento rilevato ad ogni stazione. È importante sottolineare che la scelta di posizionare *markers* riflettenti è stata strategica non solo per semplificare le operazioni di registrazione immediate ma soprattutto con una visione proiettata alle operazioni future. Lasciando tali *markers* sul luogo dopo il rilievo iniziale, sono state materializzate delle "tracce" visive per i successivi interventi di rilevamento che sono stati eseguiti dopo il restauro. Questa decisione si traduce in una maggiore coerenza e coesione nei dati raccolti, facilitando una comparazione accurata tra lo stato pre-restauro e post-restauro del monumento. L'approccio adottato nel rilievo tridimensionale del monumento mediante il 3D laser scanner GS 100 ha dimostrato una chiara attenzione alla completezza, alla precisione e alla pianificazione per il futuro.

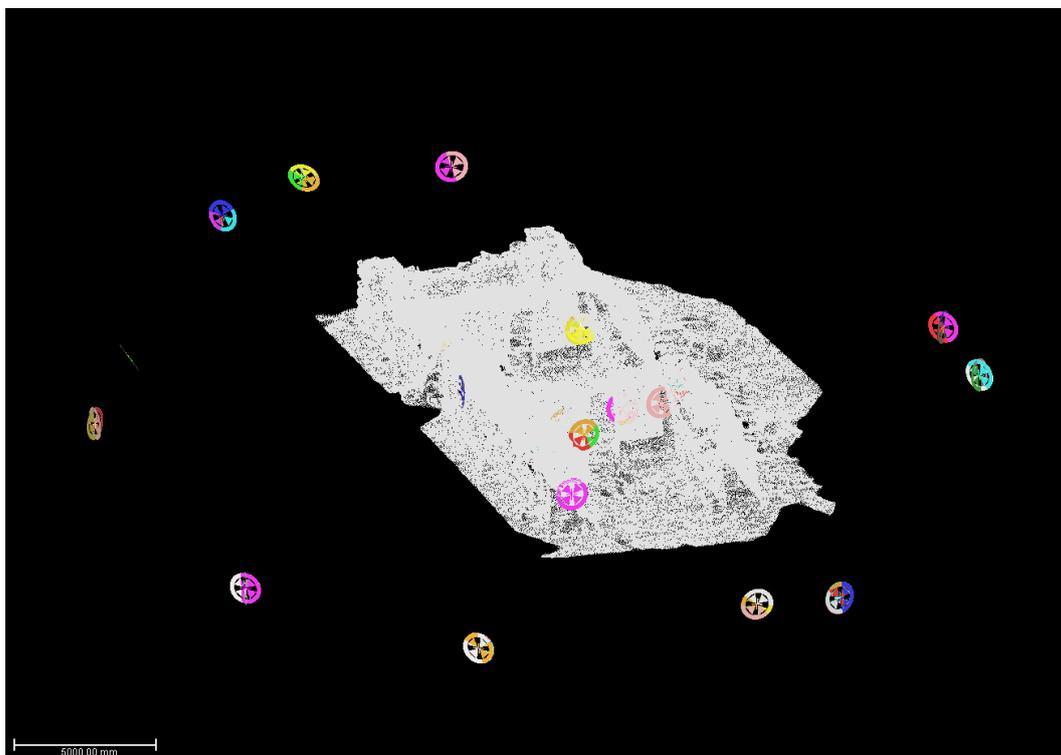


Fig. 55 - Domu de Orgia. Nuvola di punti con in evidenza i markers utilizzati per la registrazione del modello.

Rilievo TOF

Il processo di rilievo tridimensionale è un'operazione complessa che richiede una pianificazione attenta e una distribuzione efficace delle attività. Nel contesto del rilievo del monumento in questione, la sua completezza è stata garantita attraverso un impegno che si è esteso su due giornate di lavoro, coinvolgendo due operatori specializzati. Questo approccio ha consentito una raccolta dei punti adeguata a ogni fase dell'operazione, garantendo precisione e dettaglio. Ogni punto di stazionamento, fondamentale per ottenere una copertura completa dell'area di interesse, ha richiesto in media quarantacinque minuti di lavoro. Questo periodo è stato suddiviso in due momenti principali: quindici minuti dedicati al posizionamento accurato della strumentazione e alla collocazione dei *markers* riflettenti, e trenta minuti effettivi per l'acquisizione dei dati relativi all'area selezionata. Il 3D laser scanner in dotazione consente, infatti, di selezionare l'area di interesse delimitandola a video, grazie alla videocamera *real-time* integrata e al PC o palmare collegato in rete. Questa suddivisione del tempo riflette l'importanza di un approccio metodologico equilibrato, dove la fase preparatoria e quella di acquisizione vengono entrambe considerate con attenzione. In totale, sono stati rilevati 17 milioni di punti durante il processo di scansione. Questa abbondanza di dati è il risultato della minuziosità con cui è stata condotta l'operazione, finalizzata a catturare ogni dettaglio significativo del monumento. Successivamente, per ottimizzare l'utilizzo dei dati raccolti, è stata eseguita un'eliminazione dei punti superflui, con procedure sia automatizzate che manuali, riducendo il totale a circa 13 milioni. Questo processo di riduzione è fondamentale per garantire che solo i dati essenziali e rappresentativi vengano utilizzati nelle fasi successive, semplificando l'analisi e la visualizzazione dei risultati. Il software utilizzato per le operazioni di allineamento e semplificazione è *RealWorks Survey*. Il numero finale di punti per ogni singola scansione si attesta a circa 570.000. Questa cifra riflette la densità di informazioni raccolte in ciascuna acquisizione, sottolineando la capacità dello strumento utilizzato di generare un modello tridimensionale estremamente dettagliato dell'area di interesse. La precisione e la minuziosità di questo processo sono cruciali per garantire una rappresentazione accurata del

monumento e per facilitare la successiva fase di interpretazione dei dati. L'impiego di due giornate di lavoro e due operatori ha permesso di ottimizzare non solo il tempo dedicato a ciascun punto di stazionamento ma anche di affrontare con successo eventuali imprevisti o difficoltà legate all'ambiente circostante. Questa distribuzione delle attività ha garantito una maggiore flessibilità nel processo di rilievo, consentendo una risposta adeguata alle variabili ambientali e strutturali che possono influenzare la qualità dei dati raccolti. La distribuzione attenta delle attività nel rilievo tridimensionale, l'attenzione al dettaglio nei tempi di posizionamento e acquisizione, e la gestione accurata dei dati rappresentano aspetti critici di un processo complesso. Il risultato finale di 570.000 punti per ogni scansione sottolinea l'approccio accurato e sistematico adottato, confermando l'efficacia del rilievo tridimensionale nell'ottenere una rappresentazione dettagliata e completa del monumento oggetto di studio.

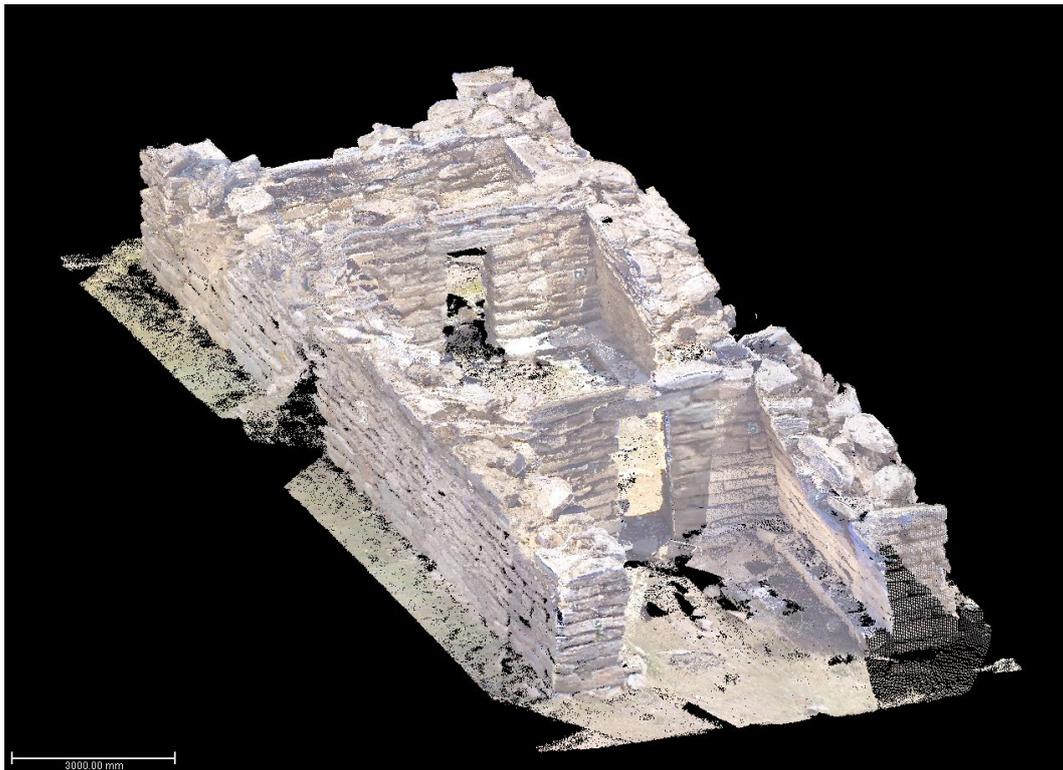


Fig. 56 - Domu de Orgia. Rilievo completo del tempio a megaron: nuvola di punti RGB.

La fase successiva al rilievo tridimensionale del monumento ha visto l'elaborazione della nuvola di punti globale, un passo cruciale per ottenere una base di riferimento solida e completa per l'analisi delle caratteristiche strutturali (Fig. 56). Questa consiste nell'esportazione della nuvola di punti in un formato appropriato, in questo caso, il formato RCP, gestibile e modificabile con il software Autodesk Recap e agevolmente condivisibile attraverso Autodesk AutoCAD. L'obiettivo principale era quello di fornire una piattaforma interoperabile per l'estrapolazione degli elaborati necessari allo studio del monumento. Il formato RCP, scelto per la sua compatibilità con strumenti di progettazione e modellazione avanzati, ha consentito una transizione fluida dalla fase di rilievo alla successiva fase di elaborazione. La scelta di questo formato è stata motivata dalla sua capacità di conservare la completezza e la precisione della nuvola di punti, garantendo che ogni dettaglio catturato durante il rilievo fosse accuratamente rappresentato nei successivi stadi di analisi e progettazione. Come richiesto dalla committenza, sono stati svolti tagli per piani prestabiliti sulla nuvola di punti per produrre diversi elaborati. La necessità di varietà nelle rappresentazioni ha portato al disegno di una vista dall'alto, una pianta ad una quota di 30 cm dal pavimento (Fig. 57), quattro prospetti, due sezioni speculari longitudinali e due sezioni speculari trasversali per ogni ambiente del monumento.

Questa varietà di prospettive consente una visione completa e dettagliata delle caratteristiche strutturali da diverse angolazioni, facilitando la comprensione e l'interpretazione degli aspetti architettonici. La produzione di elaborati grafici ha seguito una metodologia articolata. Innanzitutto, una vista fotorealistica è stata ottenuta utilizzando direttamente la nuvola di punti, sfruttando la fotocamera integrata nello strumento di rilevamento (Fig. 58). Quest'approccio ha aggiunto un elemento visivo di grande impatto, consentendo di esplorare il monumento in modo quasi tangibile, come se ci si trovasse fisicamente sul sito. L'effetto fotorealistico ha arricchito l'esperienza visiva, contribuendo a una migliore comprensione delle caratteristiche esterne e interne del monumento. Parallelamente, un secondo insieme di elaborati è stato prodotto dopo la vettorializzazione di ogni singolo elemento costruttivo.

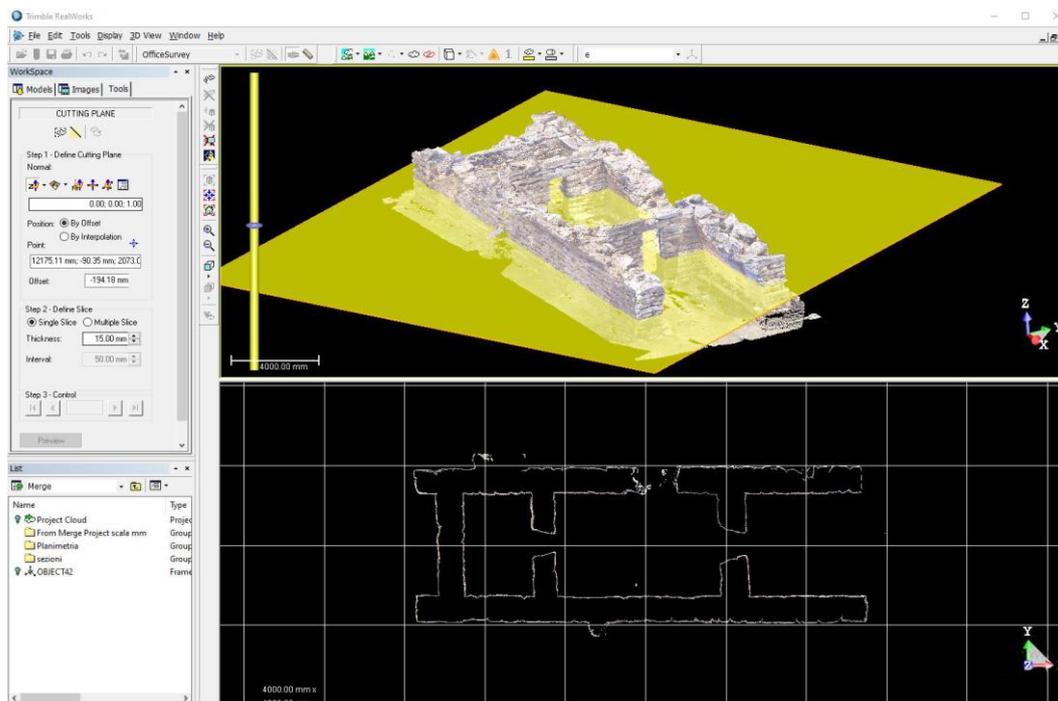


Fig. 57 - Domu de Orgia. Elaborazione di una sezione orizzontale sulla nuvola di punti.

Questo processo ha tradotto la nuvola di punti in una rappresentazione vettoriale, evidenziando con chiarezza le linee e i contorni essenziali del monumento. Quest'approccio vettoriale, sebbene meno immersivo rispetto all'effetto fotorealistico, ha fornito una rappresentazione più chiara e schematicamente precisa delle caratteristiche strutturali, facilitando l'analisi dettagliata.

Questo doppio approccio alle tavole grafiche, combinando l'aspetto fotorealistico con quello più tecnico vettoriale, ha consentito di presentare i dati in modo completo, soddisfacendo diverse esigenze di rappresentazione richieste dalla committenza. La versatilità delle rappresentazioni ha reso possibile la comunicazione efficace delle informazioni, permettendo a chiunque, dai professionisti del restauro agli archeologi, di comprendere il monumento sotto diversi aspetti. L'elaborazione della nuvola di punti rappresenta un passo critico nel processo del restauro monumentale. L'uso del formato RCP, la produzione di elaborati diversificati e l'adozione di due modalità di rappresentazione hanno contribuito a creare una base informativa completa e accessibile.



Fig. 58 - Domu de Orgia: sezione prospettica con nuvola di punti RGB.

Questa fase di elaborazione rappresenta un collegamento cruciale tra la raccolta di dati tridimensionali e l'analisi approfondita necessaria a guidare gli interventi di restauro in modo ponderato e rispettoso delle caratteristiche originali del monumento.

Rilievo differenza di fase

Dopo il compimento delle complesse operazioni di restauro focalizzate esclusivamente sull'anastilosi della parete est del monumento, senza alcuna alterazione dell'aspetto globale dell'opera, è emersa la necessità di documentare accuratamente lo stato post-restauro dell'edificio. Per questo scopo, è stato adottato un nuovo strumento: un 3D laser scanner a differenza di fase, Faro Focus 120. Questa scelta ha portato a vantaggi significativi in termini di efficienza e praticità all'interno del cantiere archeologico. Il Faro Focus 120, con la sua tecnologia a differenza di fase, ha consentito di migliorare l'efficienza rispetto al precedente Menci GS 100. Oltre alla diversa tecnica di acquisizione, sono emersi diversi vantaggi operativi che hanno migliorato significativamente

il processo di rilievo. Il Faro Focus 120, con un peso di soli 5 kg, ha introdotto una significativa riduzione rispetto ai 13 kg del Menci GS 100. Questa leggerezza ha semplificato notevolmente la gestione e il posizionamento dello strumento all'interno del cantiere archeologico. Gli operatori hanno beneficiato di una maggiore mobilità e facilità di manovra durante le fasi di rilievo (Fig. 59).



Fig. 59 - Domu de Orgia. Fasi di rilievo con 3D scanner Faro Focus.

Una caratteristica distintiva del Faro è la sua batteria al litio integrata e intercambiabile, che garantisce un'autonomia di circa quattro ore per ogni modulo. Questo ha eliminato la necessità di una fonte di alimentazione esterna, semplificando ulteriormente le operazioni sul campo. La libertà di movimento senza restrizioni da cavi ha contribuito a una maggiore flessibilità durante il rilievo. Lo strumento è stato progettato con un monitor integrato, che consente una gestione diretta dello stesso senza la necessità di collegamenti esterni come cavi di rete o WiFi (Fig. 60). Questa caratteristica ha semplificato l'interazione con lo strumento direttamente sul sito, riducendo i tempi di configurazione e

garantendo un flusso di lavoro più fluido. Il passaggio al Faro Focus 120 ha comportato notevoli miglioramenti nella velocità del rilievo.



Fig. 60 - Faro Focus 3D con monitor di gestione integrato.

Le stazioni di acquisizione hanno richiesto una media di circa 15 minuti ciascuna, includendo i tempi di stazionamento. Questo ha consentito un notevole risparmio di tempo rispetto alla fase di rilievo precedente. La rapidità nell'ottenere i dati è essenziale, specialmente in strutture in cui l'efficienza può contribuire a una maggiore copertura e dettaglio. La possibilità di eseguire scansioni individuali dei *markers* durante il rilievo ha semplificato il processo di acquisizione nel suo complesso. Il riconoscimento dei *markers* avviene in post-elaborazione, offrendo una maggiore flessibilità e facilità nella fase di analisi dei dati raccolti (Fig. 61).

La leggerezza dello strumento ha giocato un ruolo chiave nel posizionamento sicuro sopra le murature per il rilievo della parte alta del monumento. La minore massa ha ridotto il rischio di danni strutturali e ha consentito una maggiore precisione nell'acquisizione dei dettagli architettonici parte alta. In conclusione, l'adozione del Faro Focus 120 ha rappresentato una significativa evoluzione nelle operazioni di rilievo post-anastilosi del monumento. La combinazione di tecnologia avanzata, leggerezza, autonomia energetica e facilità di gestione ha contribuito alla realizzazione un processo più efficiente e meno invasivo.

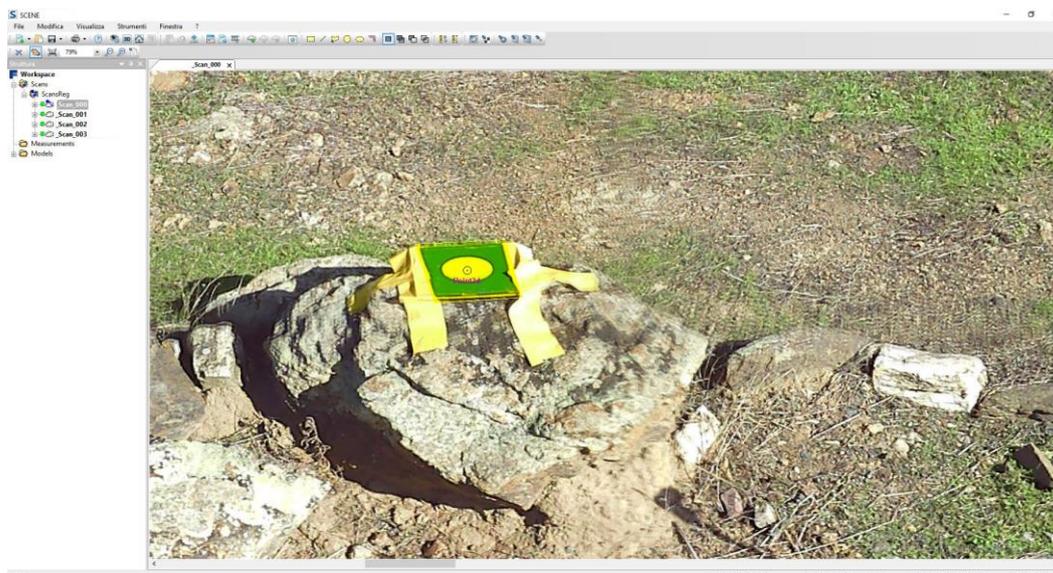


Fig. 61 - Domu de Orgia: riconoscimento dei markers.

Dopo le fasi cruciali del rilievo tridimensionale del monumento e del successivo restauro, l'attenzione si è spostata alla post-elaborazione dei dati. Un passo essenziale in questo processo è stato l'allineamento delle scansioni, un'operazione fondamentale per garantire l'integrità e la coerenza dei dati acquisiti. Questo processo è stato eseguito attraverso l'impiego del software Faro Scene, con modalità analoghe a quelle del software RealWorks Survey. Il Faro Scene ha offerto diverse modalità di allineamento, mostrando una flessibilità che ha facilitato il flusso di lavoro. L'allineamento automatico è stato reso possibile grazie all'utilizzo dei *markers* rilevati e riconosciuti automaticamente dal software. Questo approccio permette una sincronizzazione rapida e accurata delle diverse scansioni, assicurando la coerenza spaziale tra i dati raccolti. In alternativa, il software ha fornito la possibilità di utilizzare il riconoscimento visivo dei punti di riferimento sulla nuvola di punti o sull'immagine panoramica. Questa modalità manuale è risultata utile quando era necessario un intervento più specifico e dettagliato nell'allineamento delle scansioni. La flessibilità nell'approccio ha consentito di adattare il processo alle esigenze specifiche del monumento e alle caratteristiche delle scansioni acquisite. Un elemento distintivo che ha contribuito alla qualità dei dati raccolti è stata l'integrazione delle immagini catturate attraverso la camera calibrata integrata che possiede

anche il Faro Focus. Questa funzionalità ha permesso di associare immagini specifiche ai punti della nuvola di punti, arricchendo il set di dati con informazioni visive dettagliate. L'utilizzo della fotocamera integrata ha reso possibile il riconoscimento visivo di punti di riferimento sulla nuvola, migliorando ulteriormente il processo di allineamento. La nuvola di punti risultante da questo processo si è rivelata notevolmente più fitta e densa rispetto alla precedente. Questa maggiore densità di dati, sebbene preziosa per la precisione, ha richiesto una semplificazione per garantirne una gestione più agevole. L'esportazione della nuvola di punti è avvenuta ancora una volta in formato RCP, compatibile con Autodesk Recap e AutoCAD. Questa scelta di formato ha consentito una fluida integrazione dei dati nelle piattaforme di progettazione avanzate, garantendo la coerenza e la compatibilità con il flusso di lavoro complessivo. L'utilizzo del formato RCP ha agevolato ancora una volta la produzione di documentazione grafica aggiornata. Con gli stessi piani di taglio, sono stati generati prospetti, sezioni e piante che riflettono lo stato attuale del monumento dopo le operazioni di pulizia e restauro.

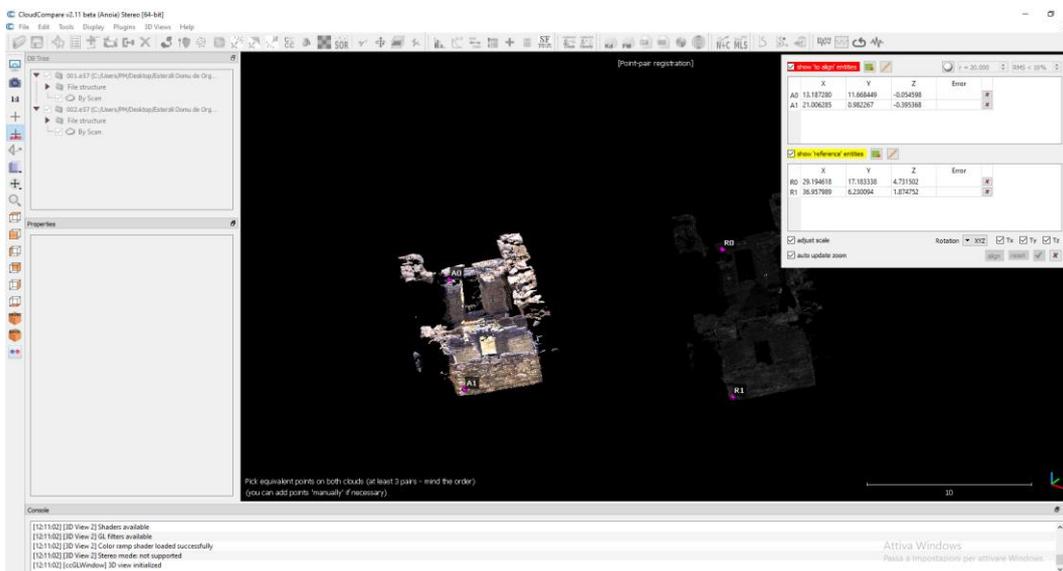


Fig. 62 - - Domu de Orgia: allineamento delle nuvole di punti provenienti dai due differenti rilievi 3D scanner.

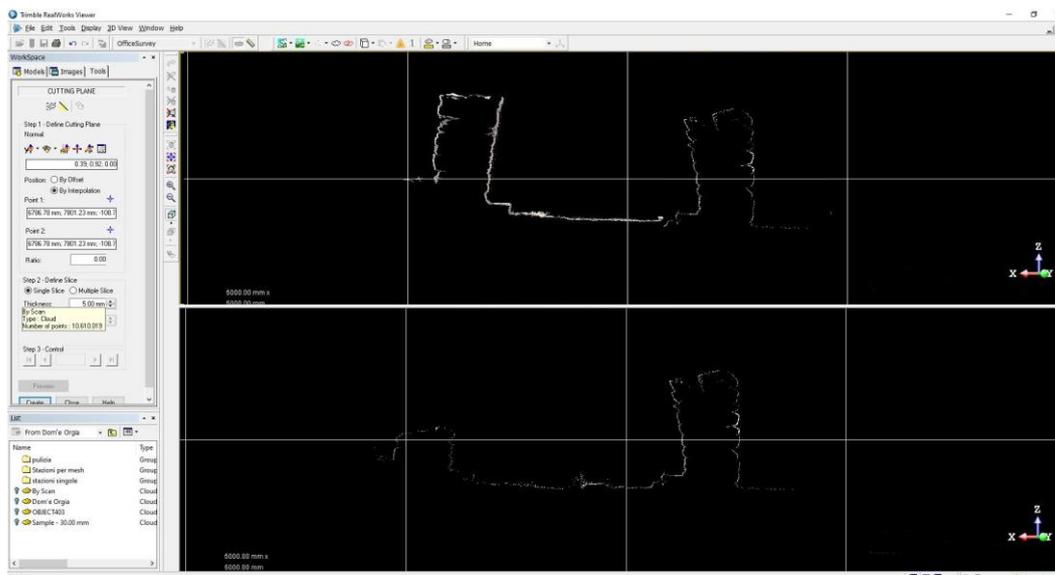


Fig. 63 - Domu de Orgia: in basso sezione prima dell'intervento di restauro; in alto sezione dopo l'intervento.

Questa coerenza tra i dati tridimensionali e la documentazione grafica è essenziale per garantire un'interpretazione accurata e una comunicazione efficace dei risultati ottenuti durante il restauro. In conclusione, l'integrazione delle tecnologie avanzate di allineamento nel software Faro Scene, insieme all'uso strategico delle immagini catturate dal Faro Focus, ha rappresentato un passo significativo nella post-elaborazione dei dati tridimensionali del monumento. La scelta oculata del formato di esportazione ha facilitato la gestione dei dati più densi, permettendo di ottenere prospetti, sezioni e piante aggiornate e coerenti.

Rilievo aerofotogrammetrico digitale con drone

A qualche anno dalla conclusione dei lavori di restauro, si è deciso di effettuare un controllo per valutare lo stato di conservazione del monumento. Questa volta, si è optato per un rilevamento utilizzando la tecnologia aerofotogrammetrica tramite drone. Quest'operazione ha permesso di approfondire, in base agli attuali progressi, i confronti tra le varie metodologie disponibili. Per ottenere una misurazione accurata, è stato necessario prima ripristinare alcuni dei punti di

riferimento utilizzati in passato, utilizzando anche strumenti topografici (Fig. 64).



Fig. 64 - Domu de Orgia: riposizionamento dei markers.

Una volta ripristinati tali punti, è stato possibile eseguire al volo con il drone: il modello utilizzato è un DJI Air 2S. I piani di volo adottati hanno seguito una metodologia comune, rispettando le principali regole della fotogrammetria aerea: dopo aver eseguito una serie di cinque scatti a circa 20 metri dal suolo ne sono stati acquisiti altri dieci ad una quota di 10 metri; a seguire sono stati fatti dei voli attorni e all'interno del monumento, con scatti obliqui e frontali dei paramenti murari e di tutti i possibili dettagli (Fig. 65). In totale le foto elaborate su Agisoft Metashape sono state 120 e hanno permesso di ottenere diversi modelli da utilizzare come termine di paragone con i precedenti: una nuvola di punti densa, una *mesh* triangolata, una texturizzata e, a seguire, una serie di ortofoto, con viste dall'alto e frontali. Per orientare il modello con gli altri ottenuti da 3D laser scanner era possibile utilizzare due differenti opzioni:

7.3. Caso di studio: l'utilizzo di 3D scanner, ZScan, SfM terrestre e da drone, camere 360 per la documentazione dell'indagine archeologica e del restauro di un insediamento di età Tardoantica

La professione dell'archeologo ha subito un'importante evoluzione negli ultimi decenni, con la necessità di sviluppare capacità e competenze non più legate soltanto allo studio dei singoli contesti e dei materiali in essi rinvenuti ma in alcuni campi di carattere più tecnico: la topografia, la progettazione dello scavo e del restauro con i relativi computi, l'archeologia preventiva. Ciononostante, l'indagine stratigrafica resta l'attività basilare e per eccellenza dell'archeologo, compreso colui che si occupa, in un cantiere importante e duraturo, quasi esclusivamente della documentazione grafica e fotografica dei lavori. Lo scavo e il restauro del contesto tardoantico di Fusti 'e Carca, in agro di Tertenia (NU), della durata di circa un anno, ha consentito di testare a fondo diverse tecniche di documentazione per un lungo periodo di tempo e su un'area di circa 1.300 metri quadrati suddivisa in quarantaquattro ambienti, con caratteristiche, dimensioni, problematiche differenti tra loro. Le criticità e le esigenze da soddisfare erano le più svariate: documentare contemporaneamente e velocemente attività di scavo archeologico e di restauro in un'area indagata di circa 2500 metri quadrati all'interno di un cantiere stradale³⁶, di cui 1300 metri quadrati occupati dal complesso archeologico; rilevare, prima e dopo gli interventi di messa in sicurezza e restauro, un totale di 126 unità stratigrafiche murarie con problematiche differenti; elaborare i dati acquisiti in breve tempo, per consentire alla squadra specializzata nel restauro di lavorare senza soluzione di continuità; verificare i dati acquisiti molto velocemente, in quanto la

³⁶ Lo scavo e il restauro dell'area archeologica di Fusti 'e Carca è stato finanziato da A.N.A.S. Spa per consentire il completamento di un tratto della nuova Strada Statale 125 - Orientale Sarda; si tratta di uno scavo di emergenza prolungatosi oltre i tempi inizialmente previsti a seguito dell'eccezionale scoperta, che ha avuto come conseguenza la modifica del tratto di strada in progetto per consentire la salvaguardia delle strutture.

successiva copertura del sito non avrebbe permesso di correggere eventuali errori o di colmare mancanze. Un'importante attività di documentazione come il rilievo di strutture e manufatti archeologici, che richiede un grande dispendio di tempo e di energie, doveva essere concentrata, organizzata e progettata in modo tale da non ostacolare le restanti attività³⁷. Solo l'utilizzo di apparati di acquisizione diversi tra loro, ma compatibili, avrebbe consentito di soddisfare appieno le esigenze del cantiere. La scelta non poteva che ricadere su tutte le tipologie di rilievo utilizzate dallo scrivente, compresa la sperimentazione di nuove tecniche (MARCIALIS 2015).

³⁷ La progettazione delle attività di rilievo archeologico e architettonico digitale rappresenta, in casi complessi come Fusti 'e Carca, un passaggio fondamentale e imprescindibile (BERTOCCI-PARRINELLO 2015).



Fig. 66 - Il sito di Fusti'e Carca al termine delle indagini e del restauro.

Il rilievo

Il 6 febbraio 2019 il sito di Fusti 'e Carca si presentava come un'area archeologica su cui insistevano i resti di alcune strutture (solo una decina di ambienti erano riconoscibili) in parte incomplete e con un elevato modesto delle murature, che in alcuni casi presentavano un solo filare. Le pessime condizioni dei resti murari erano dovute all'intenso uso agricolo che l'area ha avuto nei secoli e agli scavi clandestini che si sono protratti nel tempo.

Rilievo topografico

Le prime operazioni di rilievo, a seguito della pulizia superficiale dalla poca vegetazione presente, sono state eseguite con strumentazione GPS, con la realizzazione di una rete geodetica che includesse i circa 2.500 metri quadrati di terreno da indagare con lo scotico, per verificare la presenza di altri resti archeologici. La rete è stata materializzata con chiodi topografici, picchetti e *target*, da utilizzare con le riprese fotogrammetriche (da drone o terrestri) e come punti di riferimento per il 3D laser scanner. I *target* utilizzati erano di due tipi: i primi in plastica dura, di forma circolare e di varie colorazioni, affinché fossero ben visibili da drone; i secondi erano invece delle mire riflettenti da utilizzare sia per le riprese fotogrammetriche che per georiferire le stazioni rilevate con 3D laser scanner. Il GPS differenziale, costituito da stazione base e dispositivo mobile³⁸, si è rivelato una scelta appropriata, poiché ha permesso di avere un'ottima precisione e una totale libertà di movimento su tutta l'area, che non sarebbe stata possibile con l'utilizzo di una stazione totale. Il DGPS è risultato molto utile nel rilievo dei limiti e delle quote iniziali e finali delle unità stratigrafiche, oltre che per il posizionamento dei reperti più significativi.

Rilievo aerofotogrammetrico digitale con drone

³⁸ L'utilizzo di questo metodo, con la triangolazione che avviene grazie alla presenza di due strumenti a terra, garantisce una precisione sub-centimetrica e un'elevata rapidità di rilievo del punto, consentendo all'operatore di muoversi in totale libertà e di rilevare il punto in pochi secondi.

A seguire è stato fatto un volo con il drone, che ha portato all'elaborazione di un modello 3D texturizzato e di una ortofoto quotata su Agisoft Metashape. I piani di volo utilizzati avevano tutti una metodologia comune, che ha seguito le principali regole della fotogrammetria aerea: nelle aree abbastanza vaste come quella di Fusti 'e Carca è opportuno acquisire una serie di immagini zenitali a diverse quote, organizzate per una o più strisciate in base alla porzione del sito da rilevare. Nel primo volo, con una porzione del saggio che si estendeva per circa 300 metri quadrati, sono state progettate tre strisciate, una a 30 metri di quota (3 immagini) una a 20 metri (12 immagini) una a 10 metri (25 immagini); il rilievo è stato completato con una serie di 12 fotografie oblique attorno al saggio³⁹, per un totale di 50 immagini, tutte elaborate e allineate. La mancanza di importanti elevati murari in questa fase dello scavo non ha reso necessario un rilievo di dettaglio. L'ultimo volo con drone, risalente al giorno 25 luglio del 2021, è stato fatto al tramonto: infatti, nell'area di Fusti 'e Carca, la presenza di una collina a ovest fa sì che nei mesi estivi la luce diretta del sole non arrivi sul sito per oltre due ore, consentendo di avere al livello del suolo una luminosità pressoché uniforme e una totale assenza di ombre. In questo ultimo rilievo sono state acquisite oltre 700 immagini: 10 a 50 metri di quota; 30 a 20 metri; 60 a 10 metri; 59 immagini oblique a circa 20 metri, le restanti all'interno degli ambienti (Fig. 67); almeno due immagini di dettaglio dello strato finale conservato all'interno di ogni ambiente; almeno 8 immagini consecutive delle murature che delimitano ogni singolo ambiente; numerose fotografie di dettagli non trascurabili.

³⁹ Nei casi in cui il saggio sia molto esteso si possono programmare strisciate di foto oblique, inquadrando l'oggetto da almeno quattro direzioni.

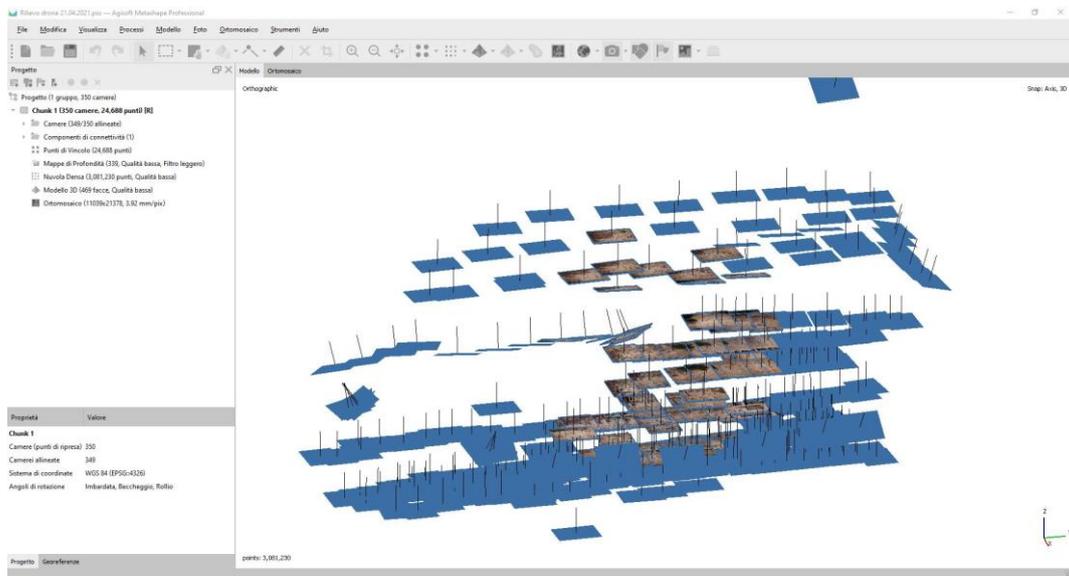


Fig. 67 - Fusti'e Carca (Tertenia): uno dei rilievi eseguiti con drone; in evidenza il posizionamento dei punti di presa, organizzati a più livelli di quota e per strisciate.

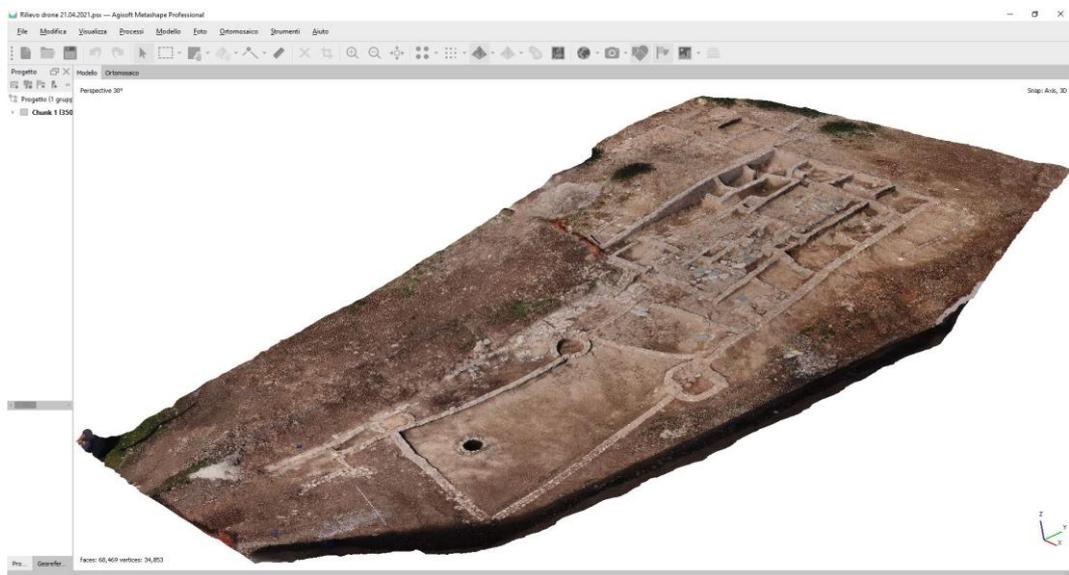


Fig. 68 - Fusti'e Carca (Tertenia): vista del modello tridimensionale realizzato con fotogrammetria digitale.

Questo dato dà un'idea della straordinaria quantità di dati acquisiti e dell'enorme differenza tra le fasi iniziali dell'indagine, in cui ci si aspettava di concludere il lavoro in poche settimane, e di quello che invece è stato il risultato finale. Tutti i voli sono stati eseguiti in modalità di pilotaggio e di scatto manuale, per avere

il massimo controllo della messa a fuoco, della luminosità e, in generale, della qualità di ogni singolo scatto⁴⁰. A fine cantiere erano state acquisite ed elaborate oltre 5.000 foto aeree, con una serie di rilievi di carattere generale e di almeno un modello e una ortofoto di ogni singola unità stratigrafica.

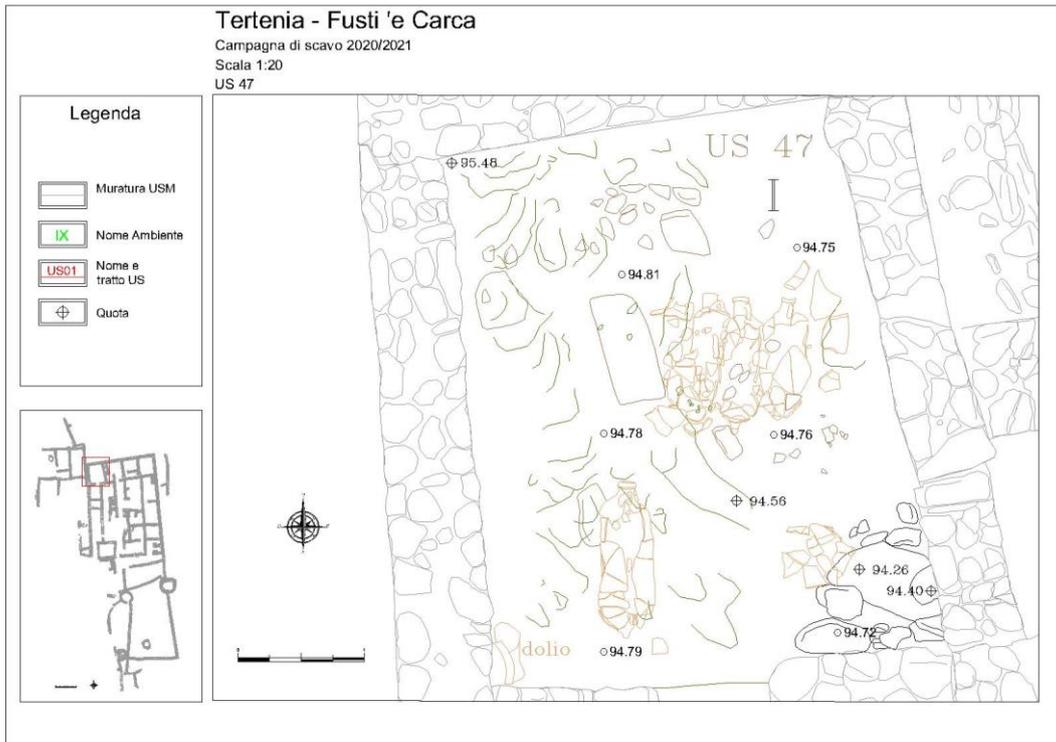


Fig. 69 - Fusti'e Carca (Tertenia): pianta di strato elaborata con la vettorializzazione delle ortofoto ottenute da rilievo SfM.

A titolo esemplificativo si riporta la descrizione del rilievo della US 47, uno strato rinvenuto all'interno dell'ambiente I che ha restituito 5 anfore quasi interamente ricostruite al restauro, databili al VI secolo d.C., e vari frammenti di altre anfore. Come per ogni unità stratigrafica sono stati eseguiti voli con il drone in diverse fasi dello scavo, sempre dopo aver rilevato un piano quotato con il GPS. I modelli del terreno ottenuti, orientabili grazie ai target posizionati sulle murature, sono stati elaborati con Agisoft Metashape, per l'ottenimento di

⁴⁰ Esistono applicazioni (Pix4D, UGCS Pro, etc.) che consentono di programmare i piani di volo e di eseguire rilievi in modalità automatica o semiautomatica, ma esperienze pregresse non soddisfacenti hanno fatto optare lo scrivente per la modalità manuale.

un modello texturizzato che consentisse una vettorializzazione su CAD dell'immagine, con l'ottenimento di una planimetria quotata. Nel caso dell'ambiente I, i modelli dei singoli strati sono stati allineati con il software CloudCompare all'interno del modello rilevato con 3D Scanner, ottenendo una precisa georeferenziazione di tutte le unità stratigrafiche. Per il rilievo di un singolo strato o di una fase di scavo di un ambiente quadrangolare di circa 15 metri quadrati sono state sufficienti dalle 10 alle 20 foto aeree, in base al livello di dettaglio che si intendeva raggiungere e agli elementi da disegnare. Ne è conseguito che le operazioni di rilievo sul campo hanno richiesto pochissimo tempo, consentendo alla squadra impegnata nello scavo di non interrompere le operazioni, come avviene invece con il rilievo manuale o quello strumentale punto-punto (il classico rilievo ottenuto con stazione totale richiede molto più tempo e almeno due operatori). La documentazione di una singola unità stratigrafica con questo metodo necessita quindi di vari passaggi, con almeno tre strumenti e sei software differenti, trasferendo gran parte della mole di lavoro dal campo alla post-elaborazione. Il primo software utilizzato in questi casi è GeoPro Mercurio, software di gestione dei ricevitori GPS attraverso il palmare, che consente di eseguire tutte le operazioni di rilievo e orientamento. Ogni qualvolta si accende il GPS è opportuno eseguire una serie di operazioni: per prima cosa la base di riferimento terrestre, che si può posizionare in un qualsiasi punto che sia libero da ostacoli, va collegata al palmare tramite Bluetooth, per registrare la posizione riferita ai satelliti; eseguita questa semplice operazione viene quindi collegata la Rover, il ricevitore mobile, con cui si esegue la battuta dei punti di riferimento, planimetrici e di quota, fissati in precedenza sul terreno; a questo punto si può già eseguire un orientamento del rilievo, consentendo di lavorare nelle coordinate (locali o assolute) del sistema che si è scelto di utilizzare all'inizio del cantiere.

Terminate le operazioni di battuta dei punti il file del rilievo viene trasferito su PC ed elaborato su GeoPro Meridiana, che consente di correggere eventuali errori nella descrizione dei punti, eseguire semplici operazioni CAD, impostare tabelle e dati GIS, convertire il rilievo nei formati più diffusi, soprattutto in DWG (Fig. 70).

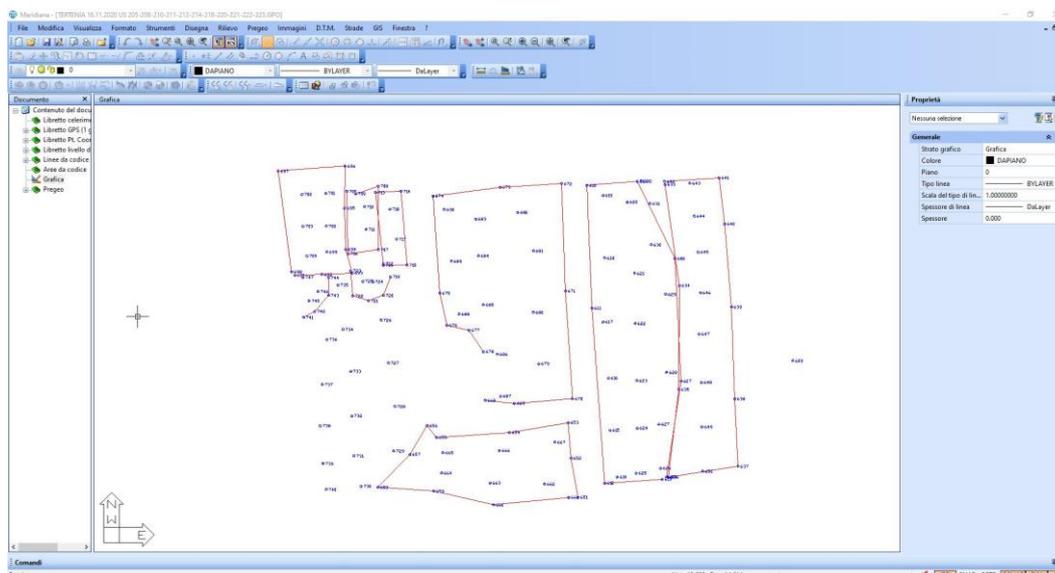


Fig. 70 - Fusti'e Carca (Tertenia): rilievo con GPS dei limiti e delle quote delle unità stratigrafiche.

L'elaborazione del rilievo aerofotogrammetrico avviene su Agisoft Metashape con i processi precedentemente descritti; il rilievo 3D scanner viene elaborato con Faro Scene, allineato se vi sono più scansioni dell'ambiente e esportato in formati condivisibili con CloudCompare (ASC, E57, PLY, LAS, etc.); con quest'ultimo software si procede all'allineamento delle varie componenti per ottenere il modello che riproduce la stratigrafia dell'ambiente e avere dei dati orientati su un unico sistema di riferimento; un ultimo passaggio avviene su AutoCAD, che consente di vettorializzare le ortofoto ottenute, organizzare le unità stratigrafiche e gli elementi contenuti in più livelli, inserire le quote e tutti i riferimenti necessari (Fig. 69).

Rilievo fotogrammetrico digitale con fotocamera terrestre

In alcuni casi è risultato utile eseguire rilievi speditivi di stratigrafie terrestri o murarie con fotogrammetria digitale SfM. Si riporta come esempio il rilievo di un tratto di circa 2 metri lineari per 80 centimetri di altezza della USM 37, che suddivide l'ambiente VI dall'ambiente VIII, che necessitava di un urgente intervento di scuci e cucii per mettere in sicurezza un tratto di opera muraria e proseguire con l'indagine stratigrafica.

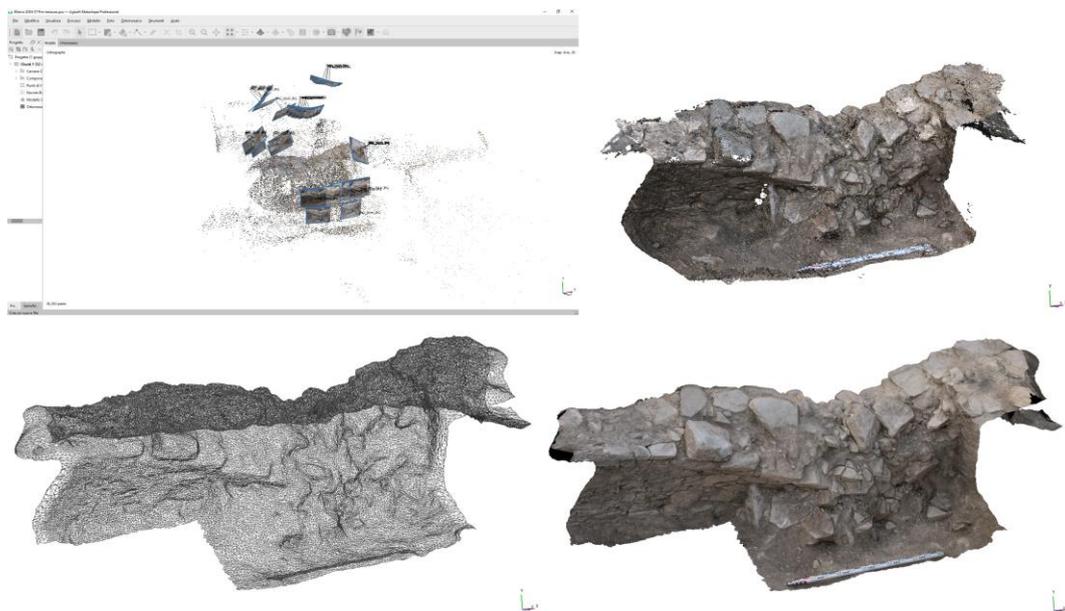


Fig. 71 - Fusti'e Carca (Tertenia): rilievo della USM 37 prima dello smontaggio, dall'allineamento delle immagini all'elaborazione della texture.

Il rilievo con fotocamera prima dello smontaggio è stato eseguito posizionando quattro target di riferimento nei pressi della struttura (battuti con GPS) e acquisendo in pochi minuti 32 immagini da varie angolazioni con obiettivo da 24 mm. La verifica della buona riuscita del rilievo è avvenuta in cantiere, con una rapida elaborazione su Agisoft Metashape e, una volta verificata la buona riuscita del lavoro, si è proceduto immediatamente con la rimozione della porzione di muro pericolante (che ha consentito il recupero di due lucerne) e con la sua ricostruzione. Terminata la ricostruzione è stato nuovamente eseguito un rilievo post-intervento.

Fotocamera 360°

L'ultima frontiera della fotogrammetria digitale è rappresentata dall'utilizzo delle fotocamere sferiche (BARAZZETTI *ET ALII* 2022; DI FILIPPO 2023). Da qualche anno i software SfM come Agisoft Metashape permettono di generare modelli tridimensionali elaborando le immagini sferiche provenienti da diversi dispositivi.



Fig. 72 - Fusti'e Carca (Tertenia): simulazione della quattro postazioni utilizzate per il rilievo dell'ambiente I con Panono 360.

In questo caso è stata utilizzata la camera Panono 360, un piccolo dispositivo che permette, anche con controllo remoto, di acquisire contemporaneamente 36 immagini digitali che vengono poi fuse in un'unica immagine sferica di altissima qualità. Questo è possibile grazie alla presenza di altrettante fotocamere distribuite in maniera uniforme sulla superficie sferica. Le tecniche SfM consentono di ottenere il rilievo in pochissimo tempo e risultano particolarmente efficaci in ambienti piccoli e complessi in cui sia la fotogrammetria piana che il laser scanner richiedono numerose stazioni di presa. Nel recente passato questa tecnologia risultava particolarmente utile per l'elaborazione di panorami e immagini a 360° da utilizzare, più che per la documentazione, con finalità legate alla divulgazione e valorizzazione. Il principio di rilievo è invariato, con la necessità di ricoprire per intero la superficie da rilevare e semplifica notevolmente l'acquisizione delle immagini nei pavimenti e nei soffitti degli ambienti. In alcuni casi sono sufficienti 3/4 scatti per ottenere un rilievo, facendo grande attenzione alla luminosità, che deve sempre essere uniforme.

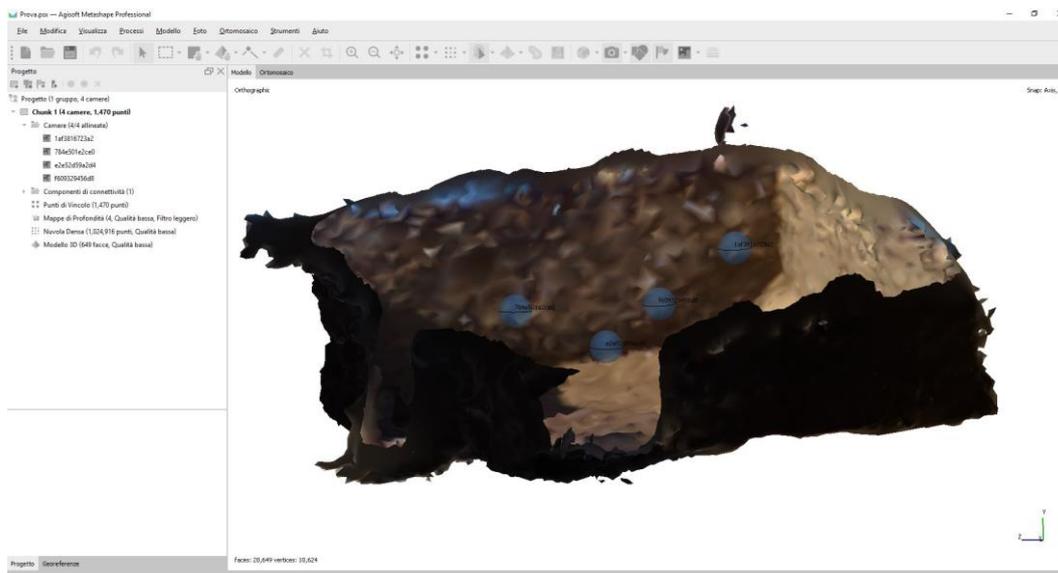


Fig. 73 - Fusti'e Carca (Tertenia): modello 3D non ancora texturizzato ottenuto con fotogrammetria sferica.

Anche in questo caso il rilievo necessita di un riferimento metrico esterno. La fotocamera Panono 360, come gran parte degli strumenti simili, permette sia di esportare le singole immagini acquisite (36 per ogni scatto) o direttamente le immagini sferiche, eseguendo lo *stitching* su *cloud* o con il software fornito dalla casa madre (FURFARO 2022). Nel caso dell'ambiente I sono state sufficienti 4 immagini sferiche per ottenere con pochi minuti di elaborazione una nuvola di punti con oltre un milione di vertici e un modello 3D texturizzato con un eccezionale effetto fotorealistico.

Rilievo ZScan

Il sistema di misurazione ZScan, che ben si presta al rilievo di elevati murari inquadabili frontalmente e senza particolari ostruzioni visive, è stato particolarmente utile negli ambienti I, VI, VII, XIII, XXXI, che sono delimitati sul lato ovest dalla USM 30, un'unità muraria oggetto di un importante intervento di restauro (Fig. 74). L'opera muraria segue nel suo sviluppo l'andamento della collina, ha una lunghezza di 22,36 metri e uno spessore murario compreso tra 0,69 e 0,78 metri. L'altezza residua varia da 1,64 metri negli ambienti I e II a soli 0,22 metri nell'ambiente XXXI. La USM 30 ha una

doppia particolarità: nella parte più settentrionale, quella che delimita a ovest l'ambiente I, gli si appoggia per una lunghezza di 4,90 metri la USM 185, che delimita sul lato est l'ambiente XXXVI, realizzato nel livello superiore della collina; a seguire si appoggia direttamente sulla roccia, che è stata opportunamente tagliata per poter realizzare il muro che, in questo caso, svolge anche la funzione di terrapieno.



Fig. 74 - Fusti'e Carca (Tertenia): rilievo dell'USM 30 all'interno dell'ambiente VI con sistema ZScan prima dello smontaggio del muro.

Le condizioni della muratura, interessata da crolli, dovuti sia alle ovvie situazioni conseguenti all'abbandono dell'ambiente, sia alle sue peculiarità strutturali, hanno comunque consentito di indagare stratigraficamente il vano, previa la messa in sicurezza dell'unità muraria che aveva subito uno spanciamento verso l'interno, con l'utilizzo di reti metalliche, pannelli da armatura e tiranti. Lo scavo della parte compresa tra il muro e la roccia ha consentito di mettere in evidenza le caratteristiche del paramento posteriore, contraddistinto da una muratura con solo tre o quattro filari residui e per il resto a sacco, per lo più di pietre piccole e lastriformi sovrapposte, intervallate con alcuni grossi blocchi sporgenti dal sacco e poggianti direttamente sulla parete

rocciosa, con la funzione di legare la muratura e conferirle maggiore stabilità. La perizia dei costruttori non ha potuto tuttavia evitare che nel corso dei secoli la spinta del terreno, dovuta alla discreta pendenza della collina, causasse un rigonfiamento della muratura in direzione est, a valle, rendendo necessarie, durante e dopo lo scavo, importanti operazioni di messa in sicurezza e restauro. Lo spanciamento del muro aveva determinato un riempimento tra questo e la roccia costituito dalle US 173 e 175.



Fig. 75 - Fusti'e Carca (Tertenia): ricostruzione della USM 30.

Contestualmente alla rimozione dei due strati di riempimento e prima di procedere allo smontaggio delle parti del paramento spanciate con l'utilizzo della tecnica dello scuci e cuci e della spinta meccanica, si è provveduto alla numerazione delle singole pietre. Per documentare al meglio lo stato di fatto e avere un termine di paragone sull'effettiva qualità del rilievo il muro è stato documentato anche con 3D laser scanner, ottenendo il massimo della precisione; il rilievo ZScan, che è risultato essere molto preciso, ha consentito di avere, in aggiunta, una elevata qualità dell'immagine (Fig. 75). L'utilizzo di queste

tecniche di rilievo e di restituzione ha consentito di non perdere alcun dato dello stato di fatto della muratura. La rielaborazione delle immagini e la successiva stampa di ortofoto della superficie hanno permesso di smontare parti della muratura in completa sicurezza e di mettere in opera gran parte delle lastre nella loro posizione originaria, con una pendenza del muro meno accentuata; ciò a seguito di un importante consolidamento del sacco del paramento. Nel rilievo eseguito dopo l'intervento, in particolare nella sezione, è evidente la restituzione della verticalità originaria delle pareti dopo l'intervento di restauro (Fig. 76).

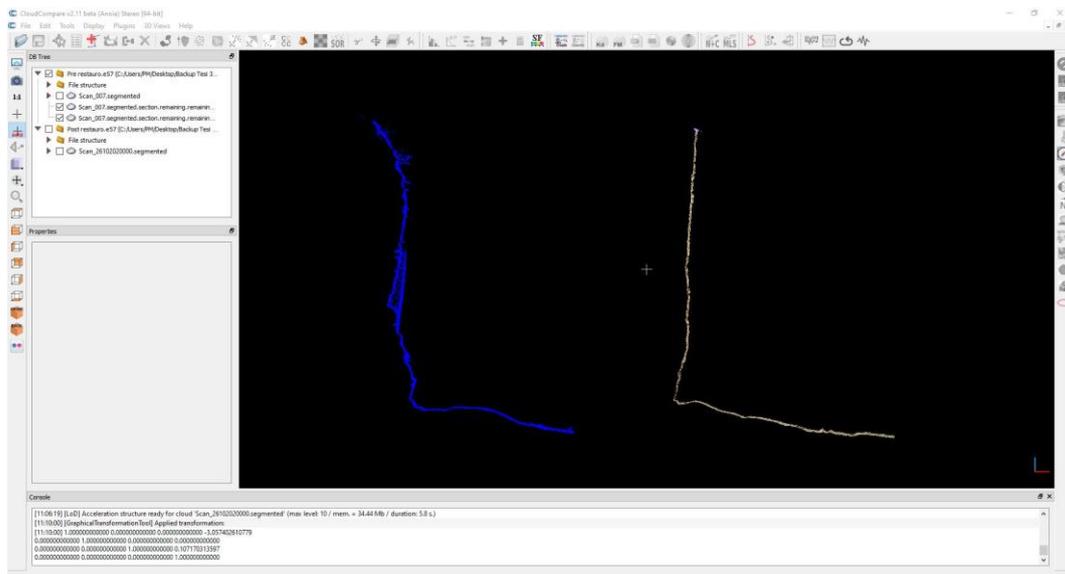


Fig. 76 - Fusti'e Carca (Tertenia): sezione delle nuvole di punti della USM 30 prima e dopo il restauro.

Rilievi 3D laser scanner

La documentazione iniziale è stata completata da un rilievo dell'area con 3D scanner terrestre a differenza di fase⁴¹. Per ottenere una nuvola di punti di tutta l'area sono state necessarie 15 stazioni di presa e altrettante scansioni. Le impostazioni dello strumento hanno consentito di ottenere una maglia di punti di circa 3 mm a 10 metri di distanza da ogni singola stazione, con un tempo di rilievo e stazionamento di 15/20 minuti per ogni scansione, comprensivo del tempo necessario allo scanner per acquisire le immagini con la fotocamera integrata. Il rilievo ottenuto, composto da circa 500 milioni di punti, ha necessitato di processi di filtraggio e semplificazione per poter essere elaborato con facilità. Il 3D laser scanner è stato poi utilizzato alla fine dello scavo per ottenere un rilievo finale dettagliato di tutti i singoli ambienti. In questo caso le scansioni sono state 125, con almeno una stazione o due all'interno di ogni ambiente, frontalmente alle murature e una serie di stazioni di collegamento, eseguite dall'esterno e al di sopra delle creste murarie (Fig. 77). Le stazioni di collegamento sono state eliminate in fase di elaborazione per alleggerire la nuvola di punti e renderla più gestibile. Utilizzare questo strumento per rilevare tutte le singole unità stratigrafiche sarebbe stato troppo macchinoso e non avrebbe consentito di avere dei risultati apprezzabili in breve tempo (ad esempio piante e sezioni dei singoli ambienti e unità stratigrafiche); avrebbe inoltre portato all'archiviazione ed elaborazione di nuvole di punti troppo pesanti e complesse da gestire.

Il modello ottenuto con il 3D scanner è stato utilizzato come base di lavoro per la successiva elaborazione di piante e sezioni, quindi come base o "contenitore" di tutti gli elaborati prodotti a fine cantiere. Sulla nuvola di punti finale sono stati quindi orientati tutti i modelli ottenuti con fotogrammetria digitale, sia area che terrestre, le piante, le sezioni e i prospetti, i punti GPS contenenti i dati spaziali delle unità stratigrafiche e dei reperti più significativi.

⁴¹ Faro Focus 3DS 120.



Fig. 77 - Fusti'e Carca (Tertenia): planimetria finale con indicazione delle scansioni eseguite.

Il sito, per questioni di tutela, è stato ricoperto al termine dei lavori, rendendo impossibile la correzione di eventuali errori o la colmatatura di mancanze; questo ci fa comprendere quanto una documentazione esaustiva sia alla base della ricerca archeologica. I lavori di restauro hanno interessato tutte le murature messe in luce nel corso dell'indagine stratigrafica e i rilievi sono avvenuti contemporaneamente per le due fasi; l'archiviazione dei dati raccolti, anche di quelli non elaborati, sarà fondamentale per futuri studi e indagini, soprattutto a seguito della chiusura dello stesso per ragioni di sicurezza. Fusti'e Carca è stato uno straordinario banco di prova per lo studio delle tecniche di documentazione, sia innovative che tradizionali; si è dimostrato che la tecnologia acquisita nell'ultimo ventennio è ormai fondamentale per lo studio dei contesti archeologici e delle architetture monumentali e che, allo stesso tempo, tutto ciò non deve prescindere dalla conoscenza dei metodi di documentazione tradizionali, che l'archeologo rilevatore deve apprendere e continuare a utilizzare.

7.4. Caso di studio: l'utilizzo di 3D scanner, ZScan, SfM per la documentazione di otto domus de janas decorate.

Nell'ambito del progetto "Arte e architettura nella Preistoria della Sardegna", finalizzato all'inserimento di trentacinque siti archeologici sardi nella Lista del Patrimonio mondiale UNESCO, rappresentativi degli oltre 5000 ascrivibili al lungo periodo che va dal Neolitico agli albori della civiltà nuragica (TANDA ET ALII 2023), lo scrivente ha preso parte alle attività di documentazione grafica e dello stato dei luoghi di gran parte dei siti candidati, in particolare di ventidue domus de janas, tre aree megalitiche, un riparo, un villaggio. Si presentano in questo caso di studio alcuni dei rilievi eseguiti all'interno delle domus de janas, le sepolture ipogee realizzate in tutta l'isola nel corso del Neolitico e dell'Eneolitico, note per i loro particolari schemi planimetrici e le straordinarie decorazioni, dipinte e scolpite. L'ipogeo funerario assume i tratti di un'architettura in negativo, il cui scopo è quello di riprodurre le abitazioni dei villaggi preistorici scavando nella roccia: in Sardegna sono state censite oltre cento domus de janas che riproducono l'abitazione del defunto. La necessità degli escavatori (figure specializzate che fin dal Neolitico si occupavano di realizzare le dimore dei defunti) di adattare le forme complesse degli ipogei al bancone di roccia, ha portato spesso alla realizzazione di cavità con forme irregolari, in ambienti per natura e volontà poco luminosi e in spazi ristretti, che rendono difficoltosi i movimenti. Queste irregolarità e limitazioni fanno sì che il rilievo tridimensionale con tecniche 3D laser scanner, ZScan e *Structure from Motion*, risulti oggi il più adatto e completo per il rilievo degli ipogei funerari preistorici. Il lavoro ha una molteplicità di scopi: comprendere quali tecniche siano più adatte al rilievo degli ipogei, quali risultati si possono attendere da una simile operazione, capire se la precisione degli strumenti consente di rilevare in maniera soddisfacente i dettagli delle pareti decorate. Verranno di seguito descritte le operazioni di rilievo eseguite su otto domus de janas, che presentano necessità di documentazione, caratteristiche morfologiche e luminosità differenti fra loro.

Il rilievo con 3D laser scanner

Per il rilievo delle domus de janas è stato utilizzato un laser scanner Faro Focus 3d a differenza di fase. La portata massima dello strumento in ottime condizioni di riflettività è di 100 m, quella minima di circa 0,30 m. L'angolo di scansione orizzontale è sempre di 360°, quello verticale di 270°, caratteristica che consente allo strumento di rilevare in maniera esaustiva un intero ambiente; l'ingombro (24 x 20 x 10 cm) e il peso (5 kg) sono abbastanza contenuti, consentendone il trasporto anche negli ambienti più ristretti. È dotato di fotocamera interna, slot per scheda SD per il salvataggio delle scansioni e interfaccia *touch* con software integrato per la gestione di dati senza l'utilizzo di PC esterno. La batteria interna ha un'autonomia di circa quattro ore ed il suo peso ridotto rende agevole il trasporto di una batteria di riserva. È dotato di sensore di inclinazione interno a due assi. La scelta di uno strumento a differenza di fase è dovuta proprio alle sue caratteristiche fisiche: dimensioni, peso, possibilità di rilevare a poche decine di cm rappresentano i punti di forza rispetto agli strumenti a tempo di volo (TOF), più adatti al rilievo all'aperto, che acquisiscono con difficoltà superfici che si trovano ad una distanza inferiore ad un metro. Il rilievo con 3d laser scanner necessita di una preliminare, seppur breve, progettazione delle scansioni da eseguire, che permette di evitare inutili perdite di tempo e l'immagazzinamento di grosse quantità di dati. Per l'utilizzo del Faro Focus 3D è stata sufficiente una progettazione preliminare su base planimetrica, considerando anche quelle stazioni utilizzate esclusivamente per il collegamento delle scansioni principali, eseguite solitamente nei punti di passaggio tra i vari ambienti. Talvolta, è stato necessario l'utilizzo di target di riferimento, sia piani (sotto forma di *markers* adesivi) che sferici (naturalmente tutti delle stesse dimensioni). L'allineamento delle scansioni è sempre avvenuto con il riconoscimento manuale dei punti comuni, anche in presenza di target. L'elaborazione di *mesh* ha permesso di calcolare volumi e sezioni. Le nuvole di punti acquisite hanno anche permesso di allineare i rilievi eseguiti con fotogrammetria digitale e ZScan, consentendo di avere un totale controllo dei livelli di errore e di ottenere dei dati perfettamente scalati.

Il rilievo delle superfici decorate con Zscan

Il sistema ZScan, già descritto in precedenza, è stato utilizzato in casi specifici, soprattutto negli ambienti in cui era necessario il rilievo di dettagli architettonici o decorativi di elevata qualità, per l'ottenimento di un dato che fosse metricamente corretto e avesse un elevato livello di dettaglio dell'immagine. Non è stato possibile, se non in rari casi, utilizzare questo sistema per il rilievo di interi ipogei, in quanto la necessità di acquisire delle triplette di immagini con l'utilizzo della barra graduata, in aggiunta all'ingombro della restante attrezzatura, avrebbero reso le operazioni troppo lunghe e senza alcuna garanzia sul risultato.

Il rilievo SfM

Le acquisizioni con fotogrammetria digitale sono state molto utili sia per il rilievo globale degli ambienti che per la documentazione dei dettagli. In questi casi, le immagini scattate dall'operatore devono essere quanto più frontali alla superficie da rilevare, possibilmente dalla stessa distanza, con buona esposizione e con una porzione di scatto comune (BORNAZ 2011). Per rendere più agevole la post-elaborazione, è opportuno l'utilizzo di target, con coordinate note e ben visibili sia sulle immagini che sui rilievi eseguiti in precedenza con 3D scanner. Risulta molto complicato l'allineamento delle immagini nei punti di passaggio tra i vari ambienti, per i quali è preferibile sfruttare le nuvole di punti acquisite con 3D scanner.

Le nuvole di punti, per quanto dettagliate e con un effetto fotorealistico immediato, non sono adatte alla ricerca e allo studio dei motivi scolpiti sulla superficie attraverso il rilievo. Per questa operazione è preferibile l'elaborazione di una *mesh*, una superficie triangolata che si calcola con l'utilizzo di software specifici, anche *open source*. Una *mesh* molto dettagliata e quanto più fedele all'originale, permette di osservare la superficie da molti punti di vista: l'utilizzo della luce radente e dei DEM (modelli digitali di elevazione) ha permesso di evidenziare sul modello la presenza di motivi scolpiti o incisi.

Il rilievo dei monumenti

Sito	Mandra Antine
Comune Località WGS84 Quota s.l.m. Orientamento	Thiesi (SS) Mandra Antine 40°30'50.39"N, 08°38'02.29"E 478 Sud-est
<p>Descrizione:</p> <p>La tomba III di Mandra Antine a Thiesi fa parte di una necropoli che conserva quattro sepolture. È celebre per la presenza di pitture parietali policrome. Presenta una struttura planimetrica a “T”: una piccola anticella, la cella principale di forma rettangolare (dipinta e con tetto piano scolpito a rappresentare il doppio spiovente) e due piccole celle laterali. A causa di crolli e danneggiamenti vari, la cella laterale sinistra, l’anticella e parte della cella principale sono prive del soffitto. Per proteggere le pitture è stata realizzata una struttura in laterizio che ingloba la parte iniziale del <i>dromos</i>, che era scoperto anche in origine. Questo ha una profondità rilevabile di 1,20 m e una larghezza massima di 0,90 m; l’anticella è di forma ellittica (largh. 1,50 m; prof. 1,05 m) ed è suddivisa dalla cella principale da un portello d’ingresso, che residua esclusivamente della parte inferiore; dall’ampia camera rettangolare (largh. 3,66 m; prof. max. 1,75 m; alt. 1,22 m) ci si immette in due celle sepolcrali: quella orientale (largh. 1,82 m; prof. 1,22 m; alt. 0,95 m) ha forma ellittica ed è l’unico ambiente integro dell’ipogeo; la cella occidentale (largh. 2,20 m; prof. 1,28 m) è, invece, del tutto priva di soffitto e ha la parete di fondo piana. Le decorazioni più importanti e meglio conservate si localizzano nella cella principale: al centro di essa, sul pavimento, si trova una rappresentazione schematica del focolare, con quattro cerchi concentrici (quello esterno ha un diametro di 0,55 m); il soffitto piano ha in realtà l’intento di rappresentare un doppio spiovente, costituito da un colmo centrale che sorregge le travi trasversali (dieci per parte), che formano dei riquadri anch’essi decorati, con motivi spiraliformi, semicerchi e bande di colore giallo pastello su sfondo grigio. La parete di fondo è quella più riccamente decorata:</p>	

presenta una falsa porta inquadrata da una banda dipinta in rosso e sovrastata da fasce policrome alternate, ricurve alle estremità a rappresentare una protome taurina, la cui testa è costituita dalla falsa porta. Dalla fascia mediana pendono sei dischi grigio scuro (tre per parte) e altri due dischi pendono da due riquadri accostati ai vertici superiori delle bande. L'architrave della falsa porta è ornato al centro da motivi a clessidra dipinti in nero.

Il rilievo

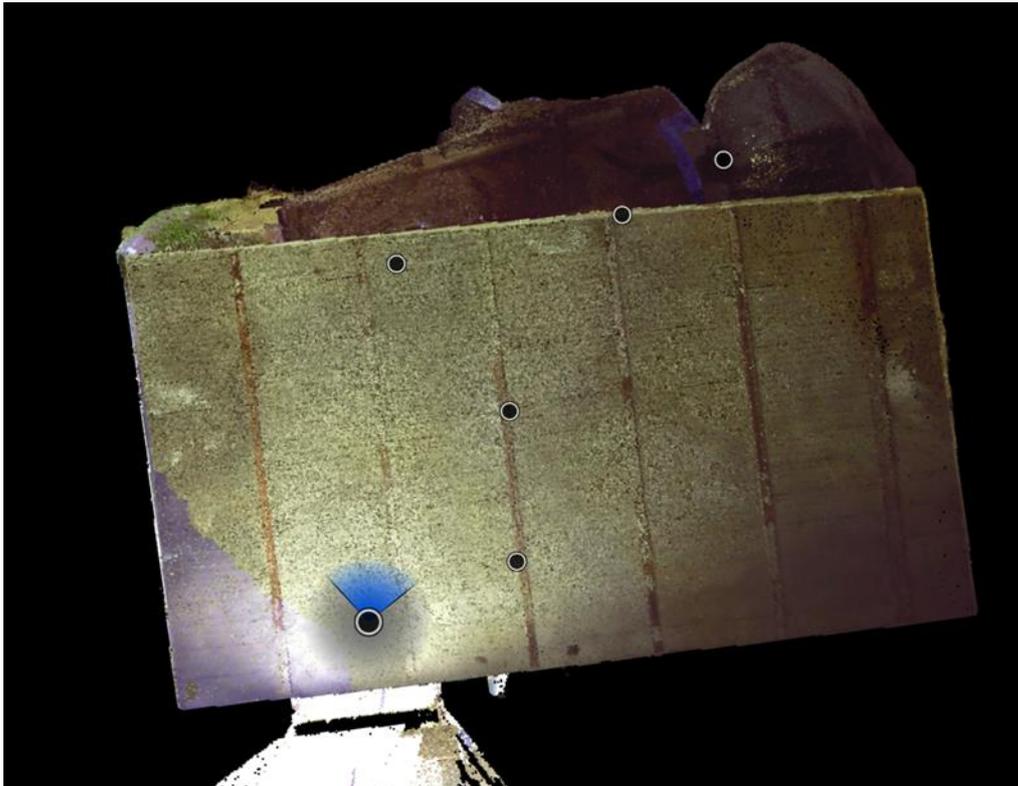
Per il rilievo con 3D scanner sono state necessarie sei stazioni di presa, alcune su treppiede e altre da terra, della durata di circa 20 minuti ciascuna, compresi i tempi di stazionamento. L'acquisizione è avvenuta con la luce naturale, che filtrava dal portello di ingresso della struttura realizzata per proteggere la sepoltura.

L'acquisizione delle immagini è avvenuta con l'utilizzo di luce artificiale, posizionando una serie di fari a LED nei punti con maggiore visibilità. Per l'elaborazione del modello sono state acquisite cento immagini, senza necessità di utilizzare target grazie alla morfologia abbastanza semplice della sepoltura.

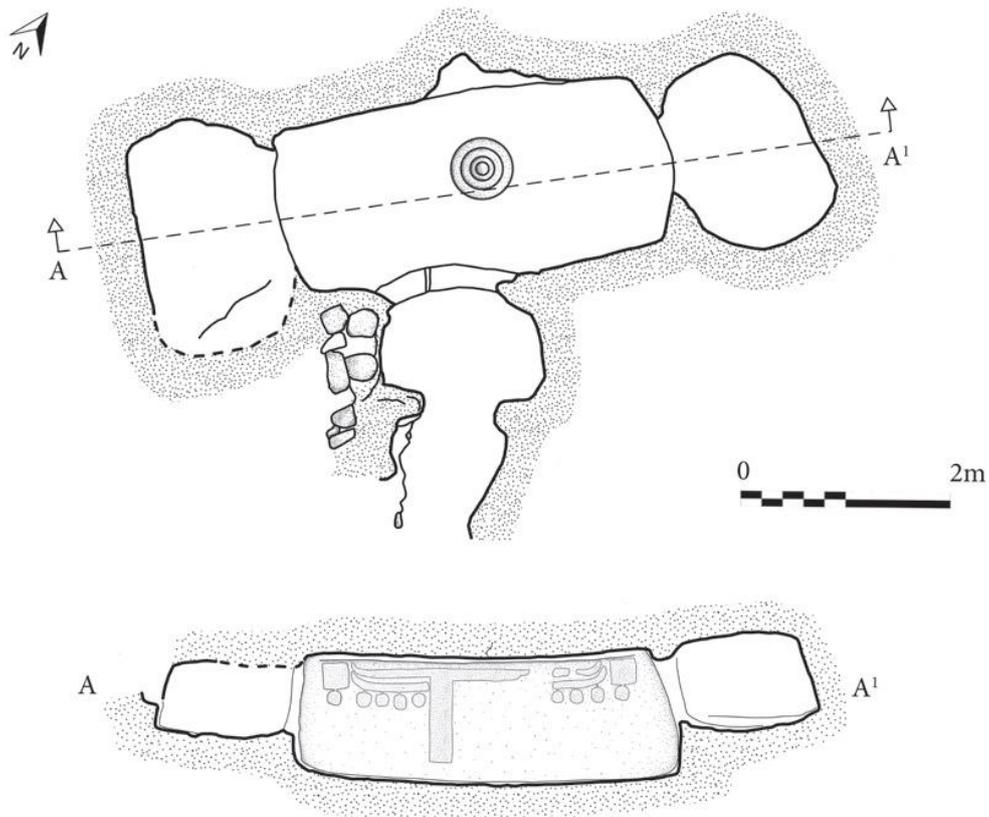
L'acquisizione con ZScan è stata finalizzata al solo rilievo della parete di fondo della camera principale, quella più riccamente decorata.

Bibliografia

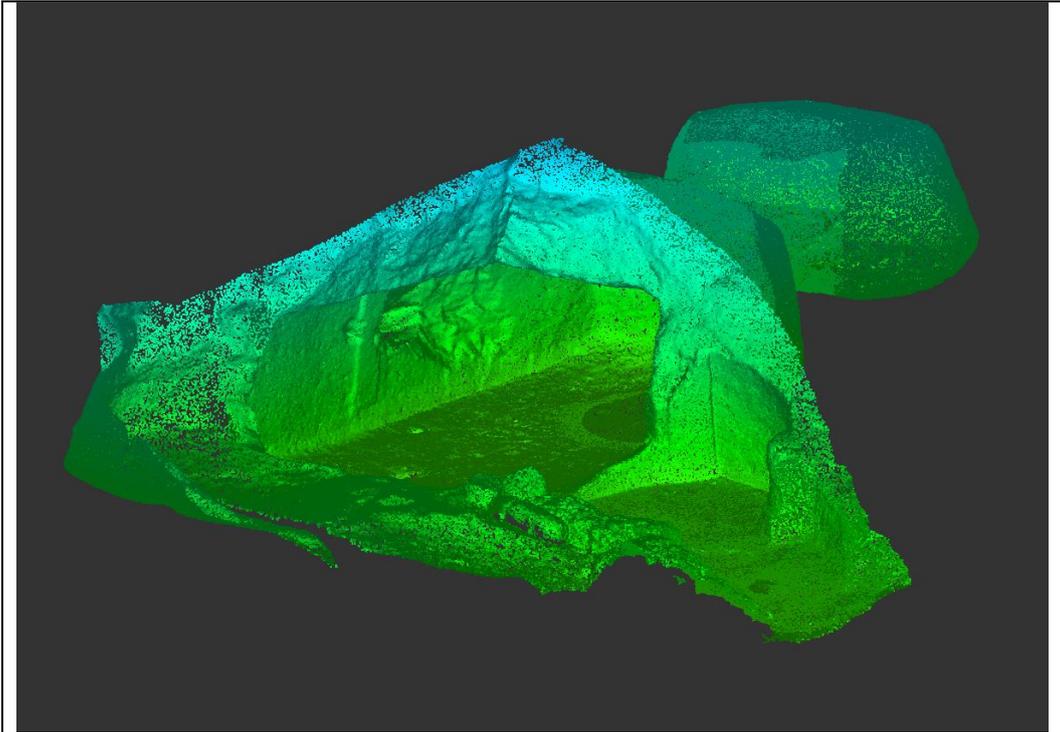
CONTU 1961; DE MARTINI 2023; MARCIALIS 2015



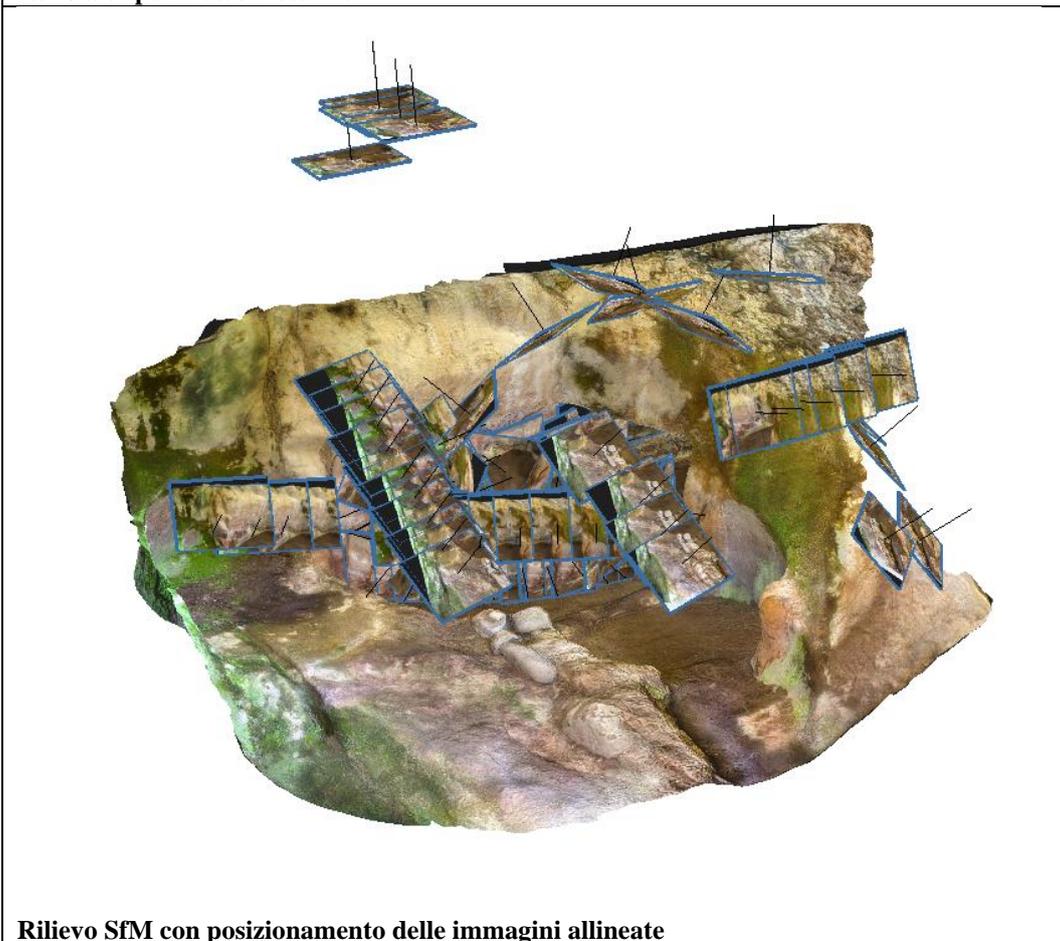
Mapa 3D con posizionamento delle stazioni



Pianta e sezione.



Nuvola di punti da 3D scanner



Rilievo SfM con posizionamento delle immagini allineate



Dettaglio decorativo realizzato con ZScan



Rilievo con 3D scanner

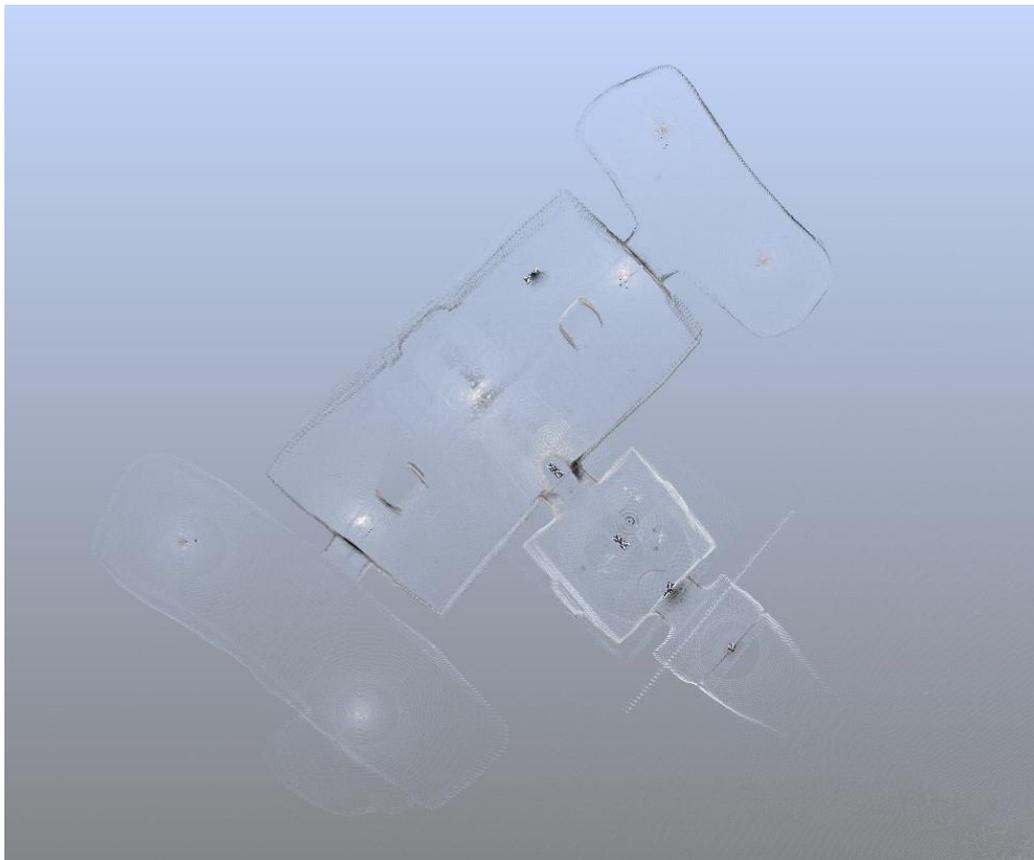
Sito	Tomba dell'architettura dipinta o S'Incantu
Comune Località WGS84 Quota s.l.m. Orientamento	Putifigari (SS) Monte Siseri 40°36'23.36"N, 08°25'48.07"E 86 Sud-est
Descrizione:	
<p>La “Tomba dell'architettura dipinta” o “S'incantu” fa parte della necropoli di Monte Siseri a Putifigari. Si tratta di un ipogeo riccamente decorato con motivi scolpiti e dipinti sulle pareti e sul soffitto. Presenta il consueto schema planimetrico a “T”, con lungo <i>dromos</i> scoperto di forma trapezoidale (lunghezza 5,41 m; larghezza max. 1,48 m), che termina con un breve padiglione a pareti piane, decorate da uno zoccolo collegato da quattro lesene ad una duplice fascia orizzontale. Varcato il portello d'ingresso (larghezza 0,68 m; altezza 0,75 m), si accede all'anticella quadrangolare (larghezza 2,01 m; profondità 1,78 m; altezza 2,03 m) con l'aiuto di un gradino-sedile (altezza 0,52 m). L'ambiente, in parte privo del soffitto, scolpito con imitazione delle travature lignee, è decorato sui quattro lati: una stretta cornice lo percorre per intero alla base, le pareti laterali presentano la falsa porta sormontata da corna taurine; il motivo della protome ricorre anche nelle pareti d'ingresso. La grande camera rettangolare (larghezza 5,80 m; profondità 3,03 m; altezza 2,26 m) presenta un soffitto inclinato con colmo centrale e travature laterali, focolare formato da quattro cerchi concentrici (il più esterno ha diametro di 1,00 m) e coppella centrale, due pilastri a sezione quadrangolare. Sulla parete di fondo si ripresenta il motivo della falsa porta con corna taurine.</p>	
Il rilievo	
<p>Per il rilievo con 3D scanner sono state necessarie quindici stazioni di presa, alcune su treppiede e altre da terra, della durata di circa 20 minuti ciascuna, compresi i tempi di stazionamento. L'acquisizione è avvenuta in parte con la luce naturale e in parte con l'utilizzo di fari a LED.</p>	

L'acquisizione delle immagini è avvenuta con l'utilizzo di luce artificiale, posizionando una serie di fari a LED nei punti con maggiore visibilità. Per l'elaborazione del modello sono state acquisite centonovanta immagini; sono stati posizionati target, rilevati anche con 3D scanner.

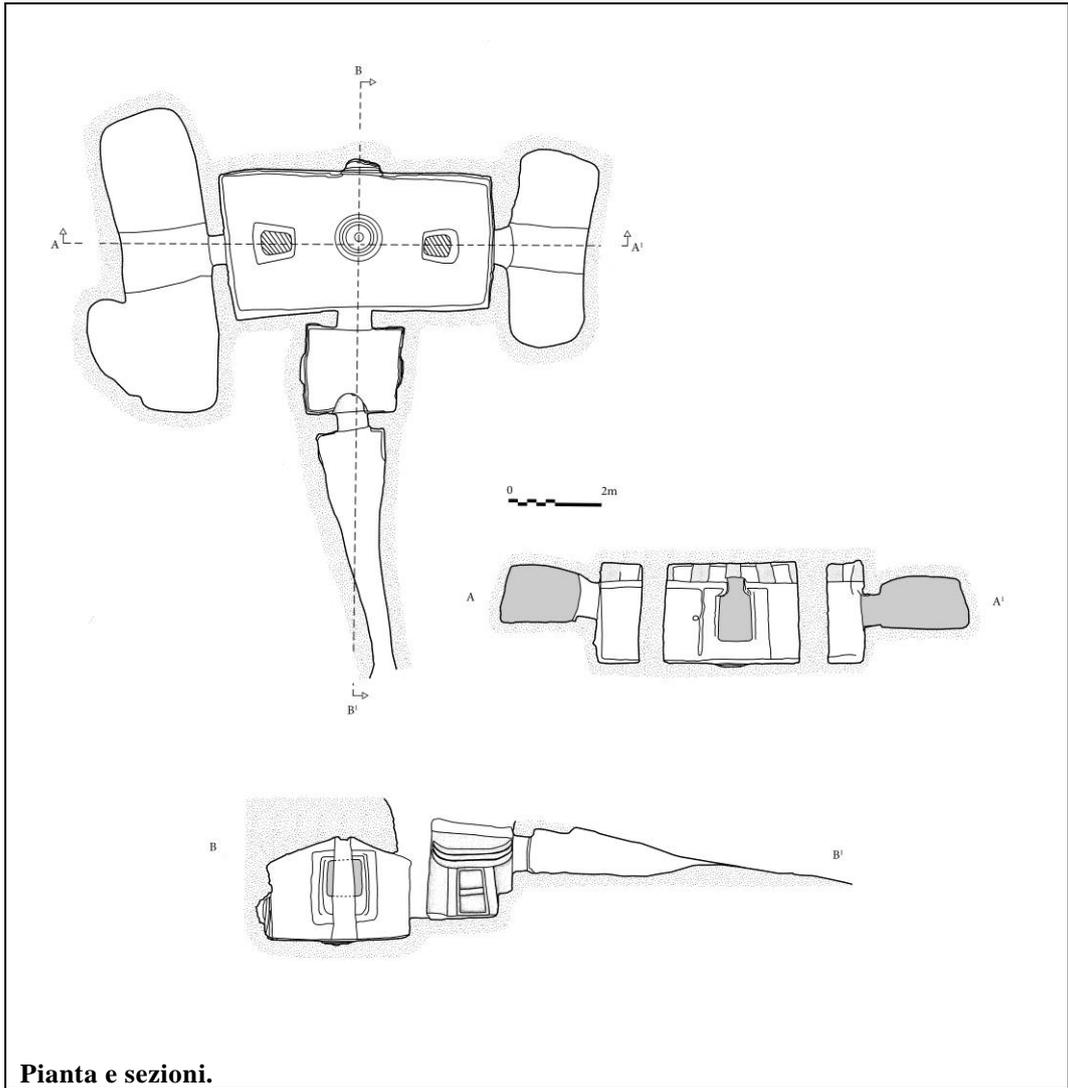
L'acquisizione con ZScan è stata utilizzata per il rilievo di alcuni dettagli architettonici.

Bibliografia

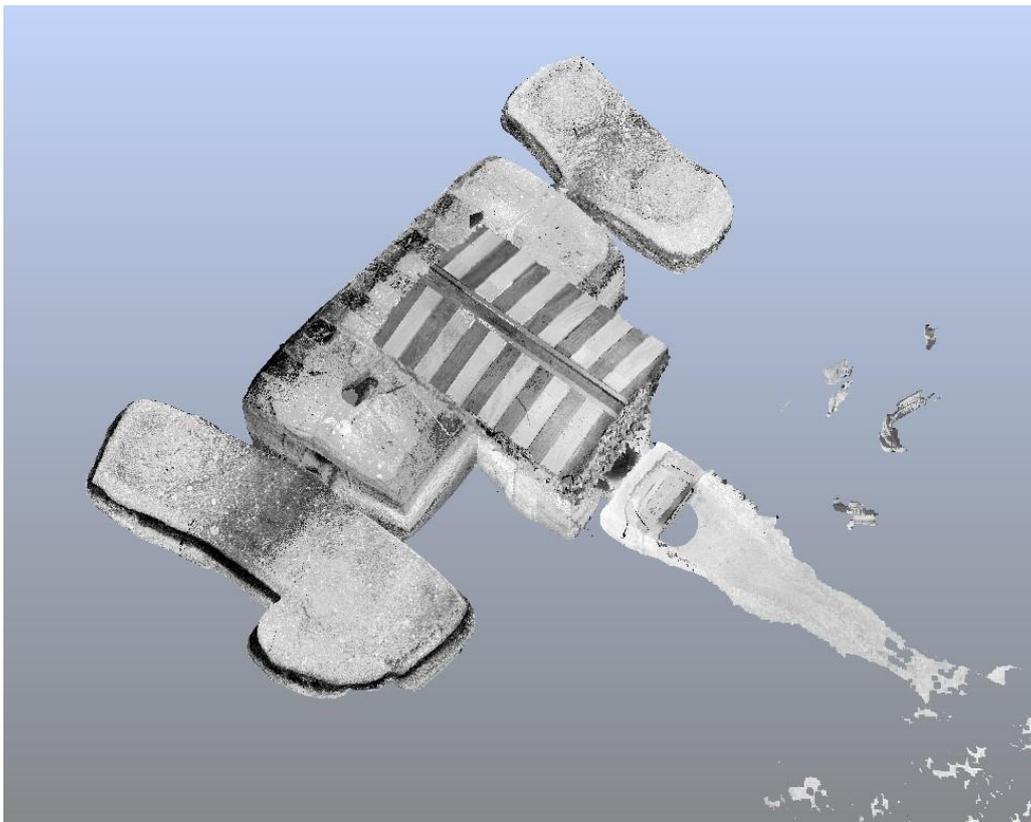
DEMARTIS 1990; DORO-CORRAINE 2023; MARCIALIS 2015



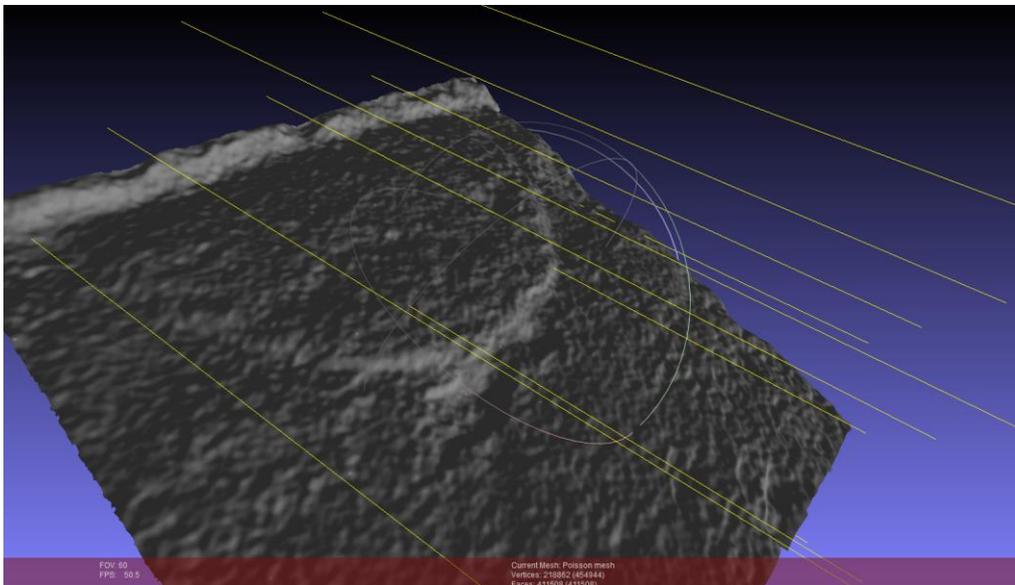
Mapa 3D con posizionamento delle stazioni



Pianta e sezioni.



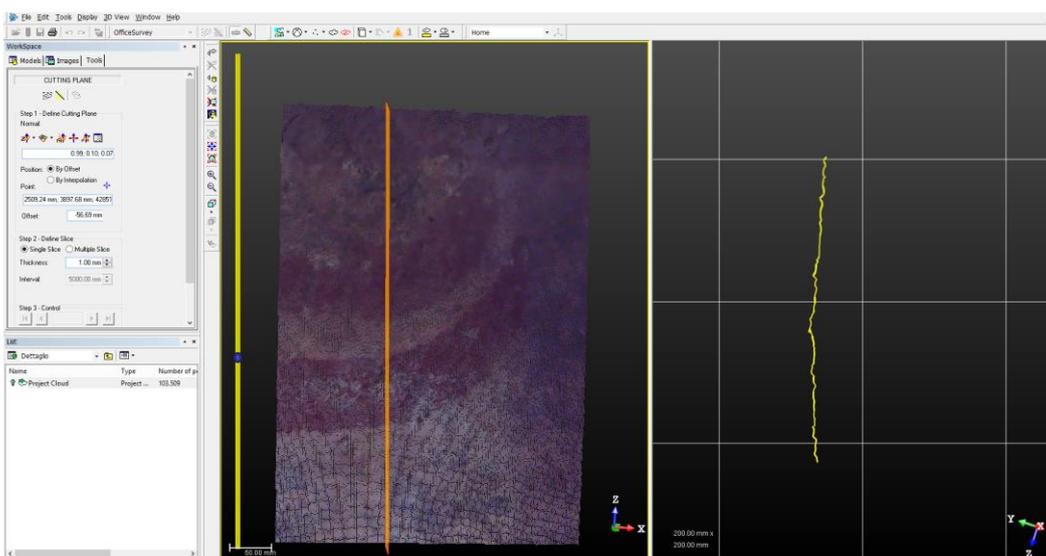
Nuvola di punti da 3D scanner



Utilizzo dei fasci di luce per l'individuazione dei motivi decorativi



Rilievo SfM - dettaglio



Dettaglio decorativo realizzato con ZScan e elaborazione di una sezione sottile

Sito	Tomba II – Mesu’e Montes
Comune Località WGS84 Quota s.l.m. Orientamento	Ossi (SS) Mesu’e Montes 40°37'53.24"N, 08°37'08.42"E 420 Sud-est
Descrizione:	
<p>La necropoli di Mesu’e Montes (Ossi) comprende quattordici tombe che si aprono su un costone calcareo. La tomba II, che si basa sullo schema planimetrico a “T”, è costituita da undici ambienti. L’ingresso, preceduto da un <i>dromos</i>, ha forma quadrangolare e da esso ci si immette nell’anticella, sempre quadrangolare (largh 2,07 m; prof. 1,74 m; alt. 1,16 m). Sul lato sinistro della parete d’ingresso si osserva una protome con testa e corna distinte. Nella parete sinistra sono presenti due zone distinte, incorniciate da lesene: nella prima zona un motivo a clessidra sovrasta un duplice motivo corniforme, nella seconda si hanno tre protomi taurine a testa e corna distinte. Da un portello sempre quadrangolare, che reca una cornice a bassorilievo dello spessore di 12 cm, si accede alla camera principale, che presenta una pianta trapezoidale con il lato lungo curvo (parete d’ingresso) e tetto piano, con rappresentazione del doppio spiovente. Il vano presenta due pilastri a sezione quadrangolare decorati con motivi a zig-zag e misura 3,70 m di larghezza max., 2,67 m di profondità e 1,48 m di altezza. Al centro della camera, nell’area compresa tra i due pilastri, si trova la rappresentazione di un focolare, costituito da due cerchi concentrici (il maggiore ha un diametro di 61 cm) e tre tronchetti di legno scolpiti. Le pareti sono riccamente decorate: presentano bande orizzontali a bassorilievo; la parete di fondo è interamente occupata da una decorazione taurina che inquadra la falsa porta, con ai lati motivi a spirale; sulle pareti brevi motivi a denti di lupo e corniformi. Sono presenti tracce di pittura rossa. La complessa disposizione planimetrica delle celle laterali fa pensare ad interventi di ampliamento e riutilizzo della sepoltura; alcune di esse hanno pareti curve, altre rettilinee, mentre tutti gli ambienti sono ben suddivisi da una soglia. Il rilievo con 3D laser scanner ha</p>	

permesso di individuare e misurare una serie di fori posizionati alla base delle celle laterali della sepoltura, alcuni visibili nella planimetria. Questi fori, che non trovano al momento confronti tipologici con le più note coppelle, sono in numero di almeno 25, hanno una forma sub-cilindrica allungata e misure differenti: il diametro dell'imboccatura varia da 0,8 a 0,14 m, la profondità (dove rilevabile, poiché alcuni sono colmi di terra) varia da 0,11 a 0,25 m. La superficie liscia e l'assenza nell'anticella e nella cella principale esclude la possibilità che si tratti di elementi naturali e, allo stesso tempo, evidenzia la volontà di distinguere questi ambienti dalle celle laterali, rafforzando l'ipotesi di una destinazione differente al momento della realizzazione della tomba (ad esempio di tipo rituale nella cella principale e di sepoltura in quelle laterali). La loro funzione rimane al momento sconosciuta. Un'analisi del terreno o delle incrostazioni superficiali potrebbe risultare molto utile. Non è da escludere la deposizione rituale di cibi e libagioni o l'utilizzo più pratico per il posizionamento di torce.

Il rilievo

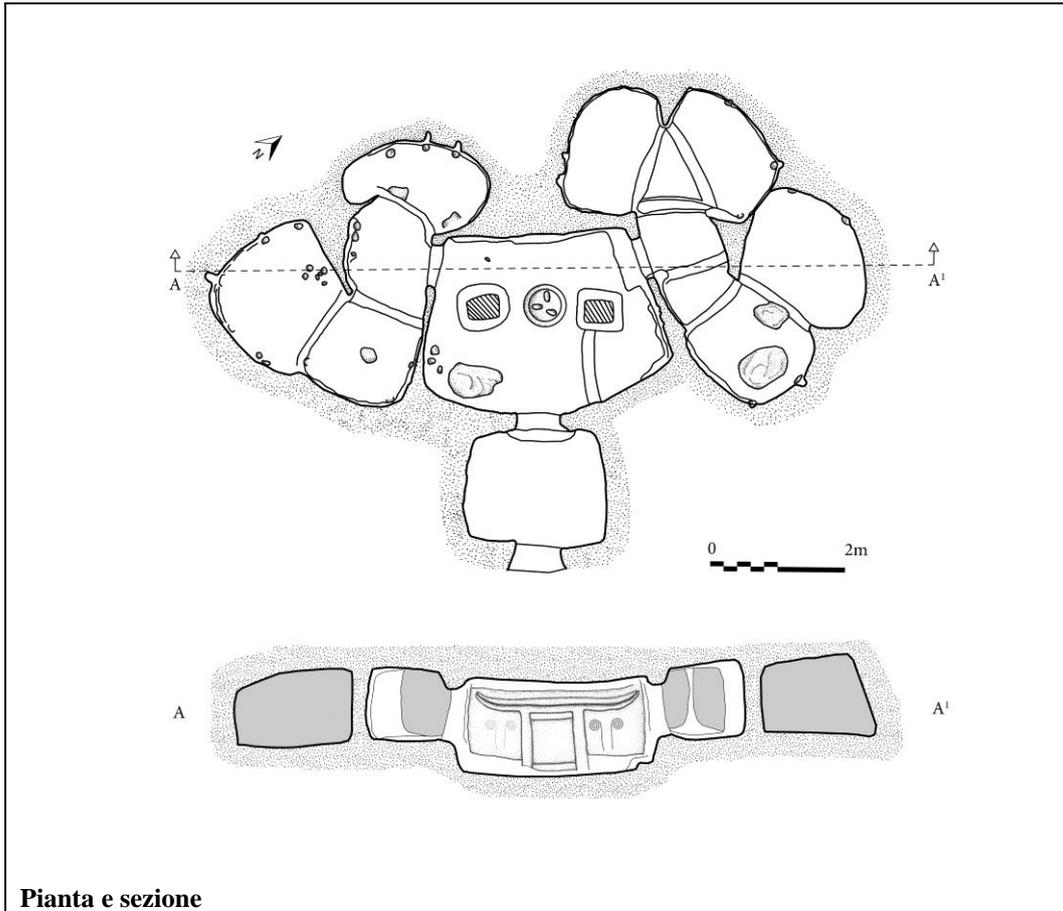
Per il rilievo con 3D scanner sono state necessarie dodici stazioni di presa, alcune su treppiede e altre da terra, della durata di circa 20 minuti ciascuna, compresi i tempi di stazionamento. L'acquisizione è avvenuta in parte con la luce naturale e in parte con l'utilizzo di fari a LED.

L'acquisizione delle immagini è avvenuta con l'utilizzo di luce artificiale, posizionando una serie di fari a LED nei punti con maggiore visibilità. Non è stato possibile rilevare tutti gli ambienti, a causa delle dimensioni ridotte di alcuni di essi.

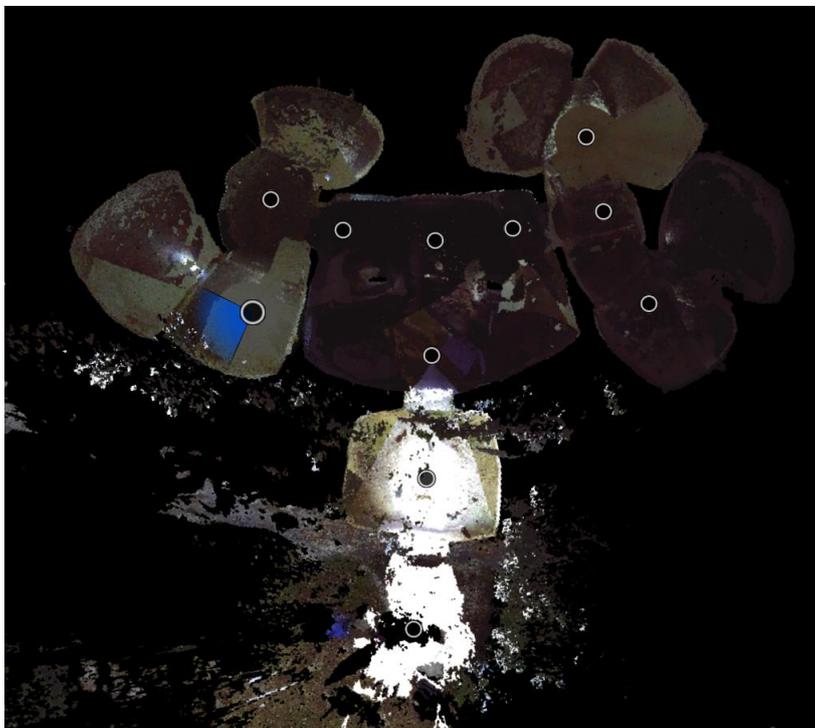
L'acquisizione con ZScan è stata utilizzata per il rilievo di alcuni dettagli architettonici dell'ambiente principale.

Bibliografia

DERUDAS 2023; MARCIALIS 2015



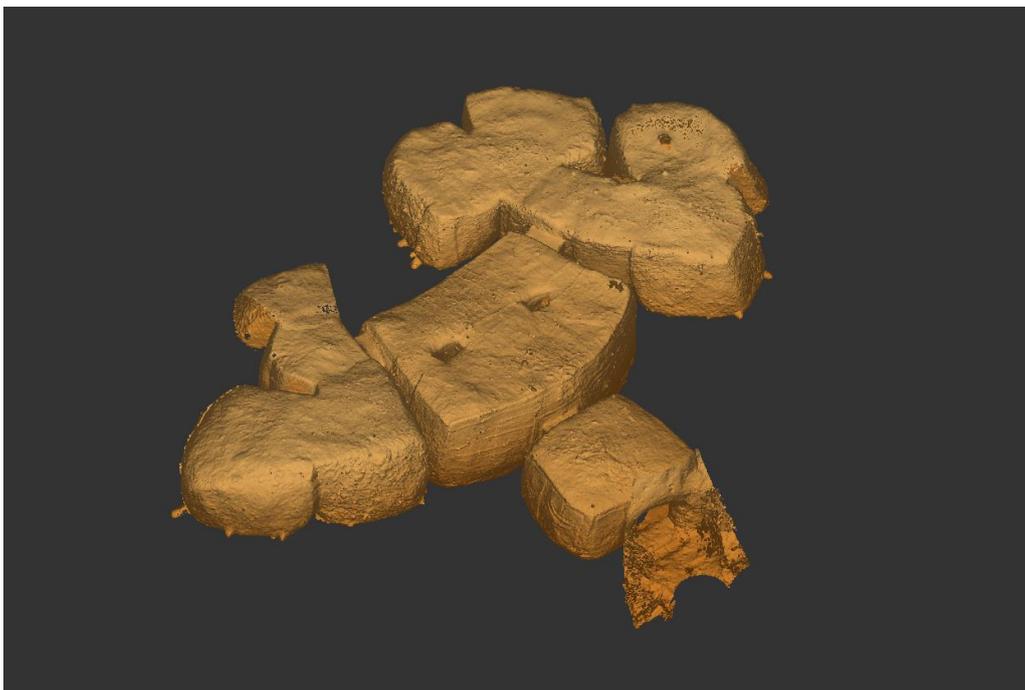
Pianta e sezione



Mappa 3D con posizionamento delle stazioni



Dettaglio in scala di grigi

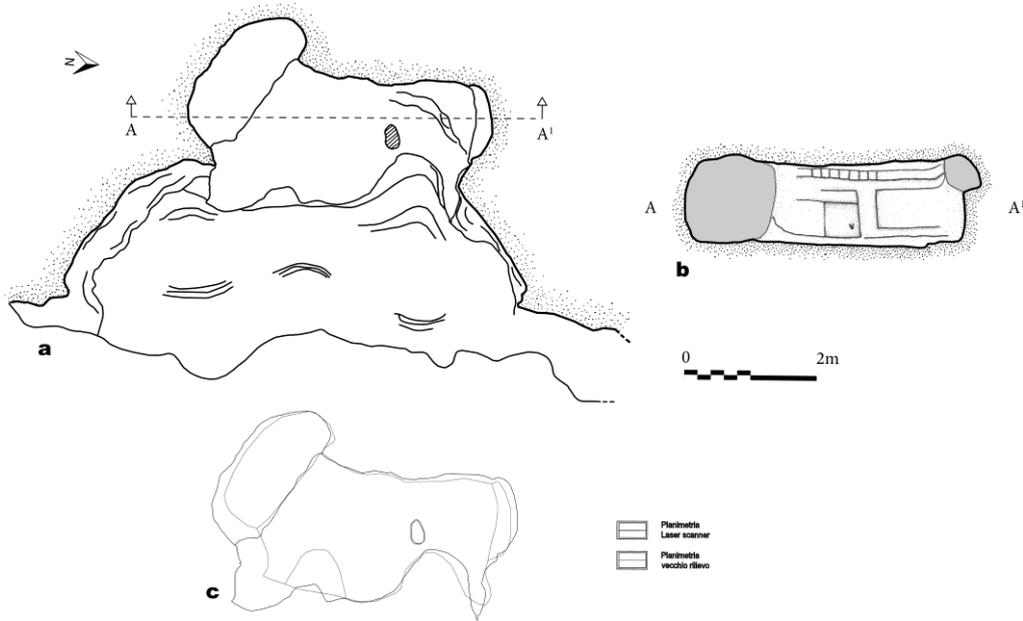


Elaborazione della *mesh*.

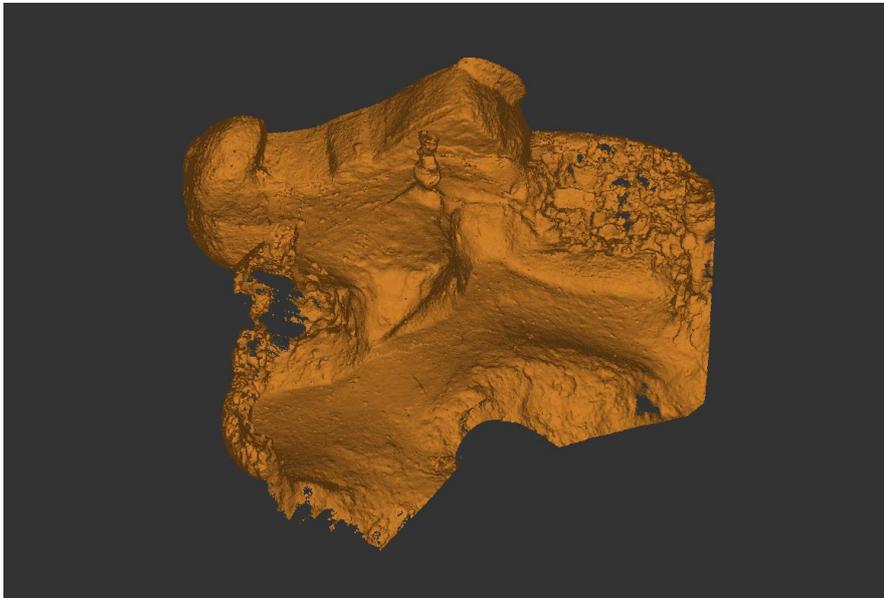
Sito	Tomba III – Enas de Cannuia
Comune Località WGS84 Quota s.l.m. Orientamento	Bessude (SS) Enas de Cannuia 40°33'39.94"N 8°37'33.68"E 600 Est
Descrizione:	
<p>La tomba III di Enas de Cannuja (Bessude) presenta pitture e motivi interessanti che, data la conformazione dell'ipogeo, sono esposti alla luce naturale. Il rilievo di questa tomba ha permesso di sperimentare come avvenga la gestione del colore con il rilievo 3D laser scanner e fotogrammetrico in presenza di luce naturale. Gli escavatori hanno realizzato la sepoltura lavorando all'interno di una cavità preesistente, su un costone trachitico che comprende altre cinque domus. L'assetto planimetrico è singolare e si adatta alla conformazione naturale della cavità. L'imboccatura della piccola grotta costituisce l'atrio alla cella (largh. 3,80 m; prof. 2,20 m; alt. 1,25 m), il cui soffitto piano è idealmente sorretto da un pilastro di forma elicoidale. Ai lati della camera si aprono due piccole alcove con pareti curve, quella meridionale sullo stesso piano pavimentale della camera, quella settentrionale leggermente rialzata. La parete di fondo presenta una protome bovina che la occupa per intero ed una banda orizzontale suddivisa a riquadri sotto il soffitto. Si riscontra la presenza di tracce di pittura.</p>	
Il rilievo	
<p>Per il rilievo con 3D scanner sono state sufficienti quattro stazioni di presa, tutte su treppiede, della durata di circa 15 minuti ciascuna, compresi i tempi di stazionamento. L'acquisizione è avvenuta in presenza di luce naturale.</p> <p>Anche l'acquisizione delle immagini è avvenuta con l'utilizzo di luce naturale, con la possibilità di rilevare tutti gli ambienti.</p> <p>La strumentazione ZScan è stata utilizzata per il rilievo di alcuni dettagli architettonici.</p>	

Bibliografia

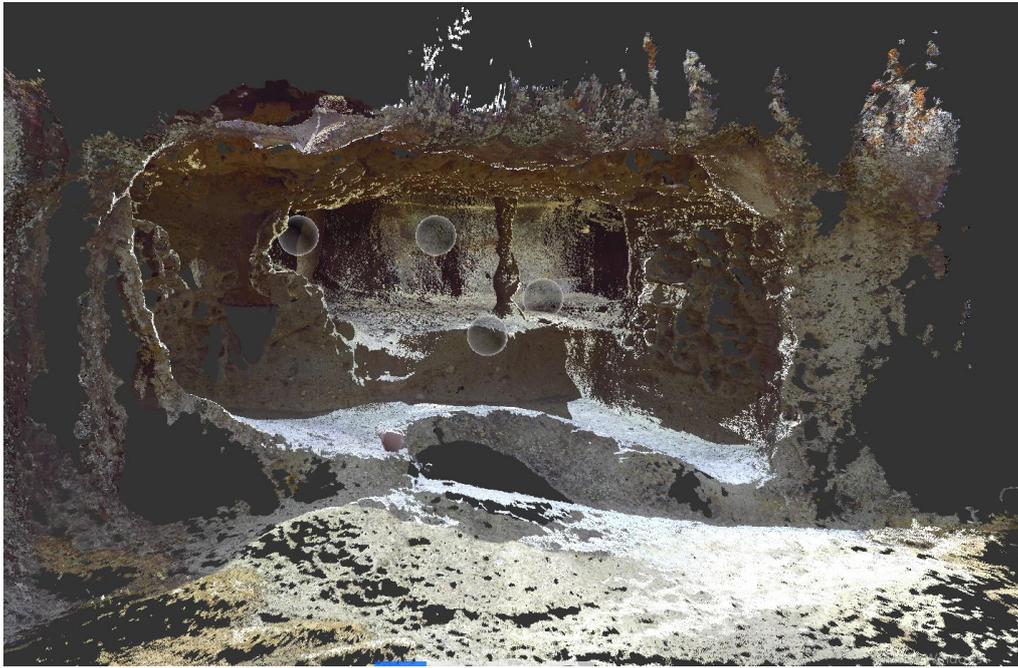
CONTU 1962, 1964; TANDA 1985; MARCIALIS 2015



Planimetria e sezione. Confronto con vecchi rilievi.



Sezione orizzontale su modello 3D

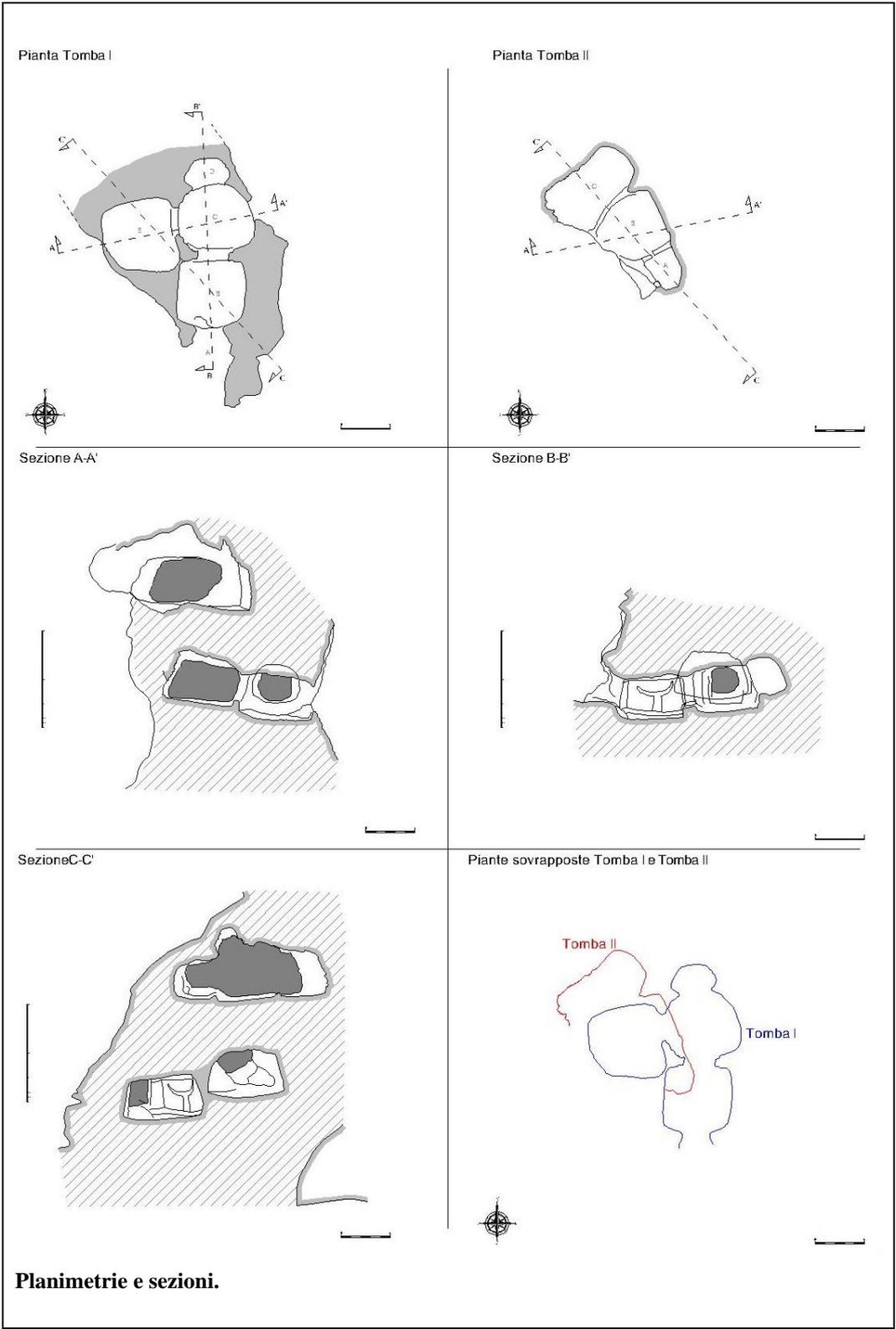


Posizionamento delle stazioni nella nuvola di punti.

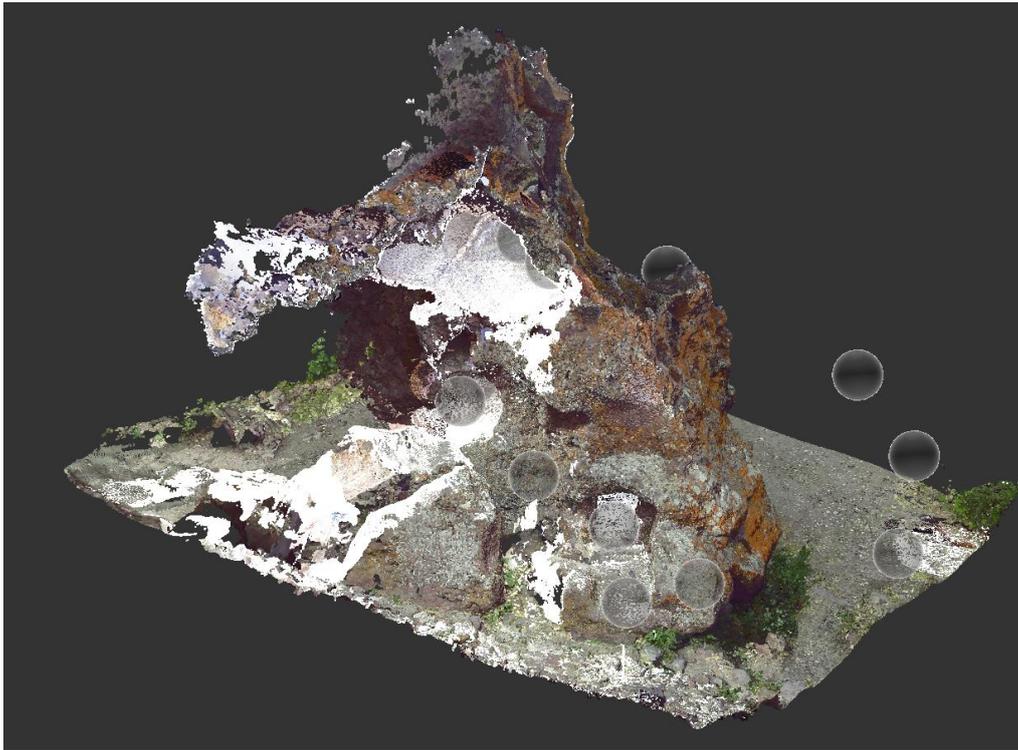


Il rilievo.

Sito	Domus de janas della Roccia dell'Elefante
Comune Località WGS84 Quota s.l.m. Orientamento	Castelsardo (SS) Roccia dell'Elefante 40°53'22.84"N 08°44'46.33"E 181 Est
Descrizione:	
<p>La Roccia dell'Elefante è un blocco di erratico noto per la sua particolare forma. Vi furono scavati due ipogei funerari, forse in momenti differenti, la Tomba I nella parte inferiore del blocco, la Tomba II nella parte superiore. A circa 500 metri è presente un altro ipogeo, noto con il nome di Scala Coperta. La Tomba I ha un breve <i>dromos</i> di circa un metro, seguito da un'anticella quadrangolare (largh. 1,37 m; prof. 1,40 m; alt. 0,83 m), che presenta dei motivi decorativi corniformi, con alla base delle pareti uno zoccolo, oltre ad una fascia nella parte superiore, appena sotto il soffitto. La cella è di forma sub-circolare (largh. 1,30 m; prof. 1,48 m; alt. 0,90 m), con una nicchia e l'apertura che porta all'altra cella sul lato occidentale.</p>	
Il rilievo	
<p>Il rilievo con 3D scanner, ottenuto a seguito di 20 stazionamenti, finalizzato a studiare i rapporti volumetrici degli ipogei, ha interessato tutto il volume del blocco erratico, nelle sue parti interne ed esterne, consentendo di ottenere planimetrie e sezioni globali. Il rilievo SfM e ZScan è stato limitato all'interno della Tomba I e dei motivi decorativi.</p>	
Bibliografia da Tanda 2023	
TANDA 1977; MELIS 2023	



Planimetrie e sezioni.



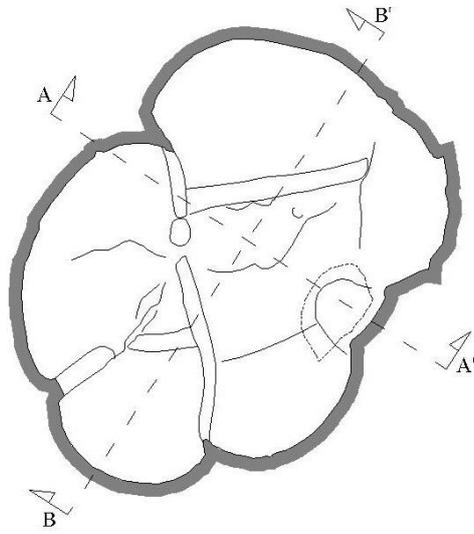
Punti di stazionamento



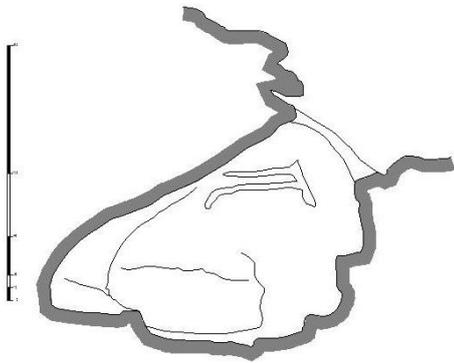
Rilievo SfM

Sito	Tomba 34 o Tomba delle Corna
Comune Località WGS84 Quota s.l.m. Orientamento	Villaperuccio (SU) Montessu 39°07'58.78"N 08°40'07.29"E 207 Est
<p>Descrizione:</p> <p>La necropoli di Montessu, composta da 35 ipogei funerari e che comprende un'<i>allée couverte</i>, si sviluppa sull'altopiano di Monte Essu, La Tomba 34 è composta da un piccolo ambiente di forma irregolare, con due o tre scompartimenti delimitati da codoli scolpiti nella roccia, con soffitto a forno. Vi si accede attraverso un'apertura e un gradino; Vi sono rappresentate delle corna taurine uniche nel loro genere.</p> <p>Il rilievo</p> <p>Il rilievo con 3D scanner è stato abbastanza semplice, con sole otto stazioni di presa, che hanno permesso di ottenere una nuvola di punti con ottima risoluzione. I rilievi fotogrammetrici hanno permesso di ricostruire l'intero ambiente con 60 immagini digitali, mentre quelli ZScan hanno permesso di documentare con buona accuratezza e senza grandi difficoltà le decorazioni presenti.</p> <p>Bibliografia da Tanda 2023</p> <p>ATZENI 1972A; CICILLONI 2009B; PAGLIETTI 2023</p>	

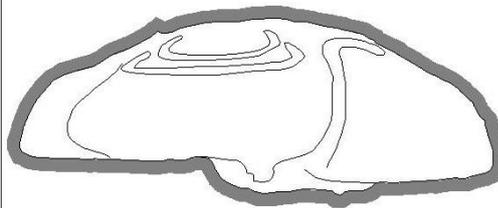
Pianta



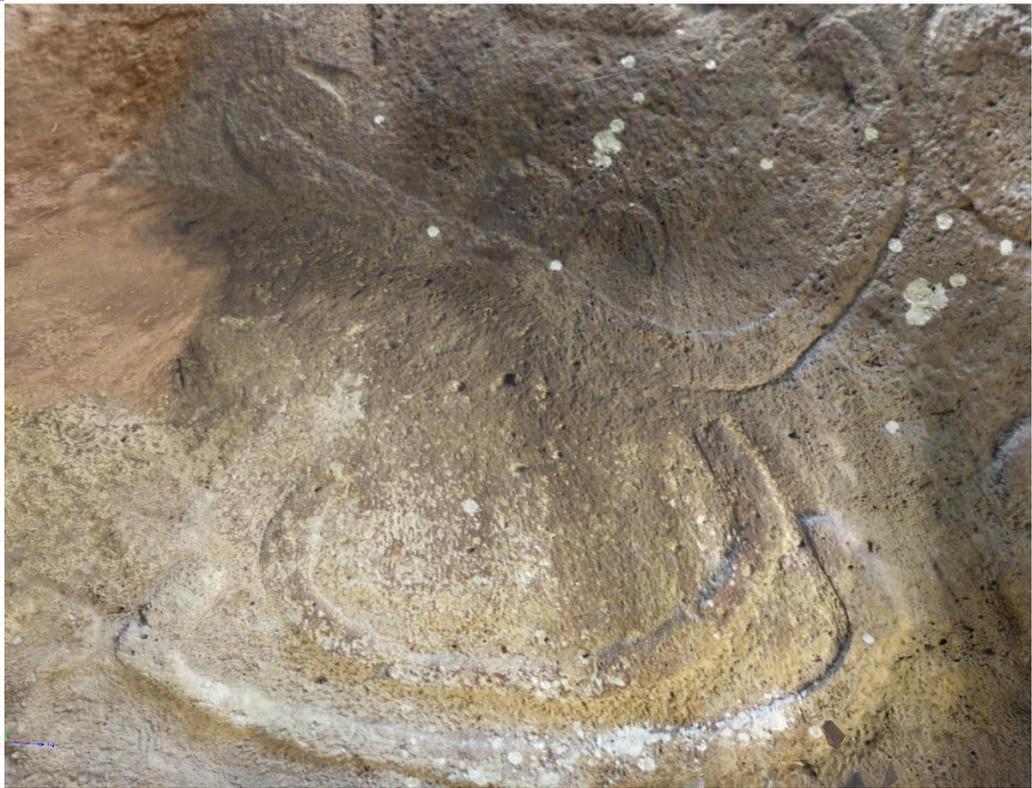
Sezione A-A'



Sezione B-B'



Planimetrie e sezioni.



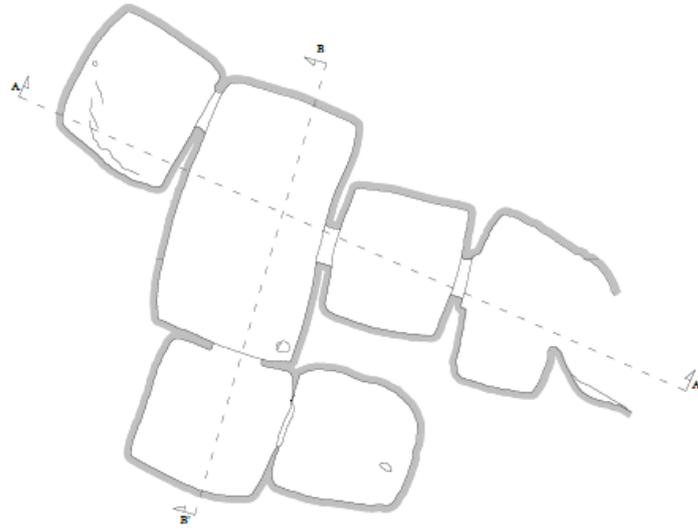
Dettaglio decorativo da ZScan



Modello texturizzato da SfM

Sito	Tomba VIII Puttu Codinu
Comune Località WGS84 Quota s.l.m. Orientamento	Villanova Monteleone (SS) Puttu Codinu 40°29'13.55"N 08°31'08.34"E 276 Est
<p>Descrizione:</p> <p>L'ipogeo si trova inserito in una necropoli scavata nella roccia calcarea, che comprende in totale nove domus de janus, quasi tutte pluricellulari. La Tomba VIII, oggetto dello studio, è l'unica con accesso sopraelevato, a circa 0,70 metri dal suolo. Ha una profondità totale rilevabile di 9,99 metri e una larghezza massima di 6,25 metri. È composta da sei ambienti, alcuni riccamente decorati. Nell'anticella, sul soffitto, è riprodotto il tetto in legno di una capanna semicircolare, mentre nella cella principale è rappresentata la capanna rettangolare. Non mancano i motivi corniformi curvilinei e la falsa porta.</p> <p>Il rilievo</p> <p>Per il rilievo con 3D scanner sono state necessarie 13 stazioni, della durata di circa 15 minuti ciascuna. I movimenti e le acquisizioni con ZScan sono stati abbastanza agevoli nella cella principale. Il rilievo SfM è avvenuto negli ambienti decorati.</p> <p>Bibliografia</p> <p>DEMARTIS 1986; MARRAS 2023B</p>	

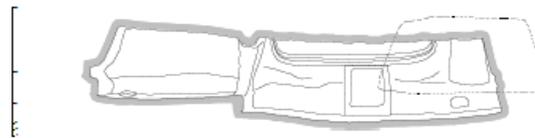
Pianta



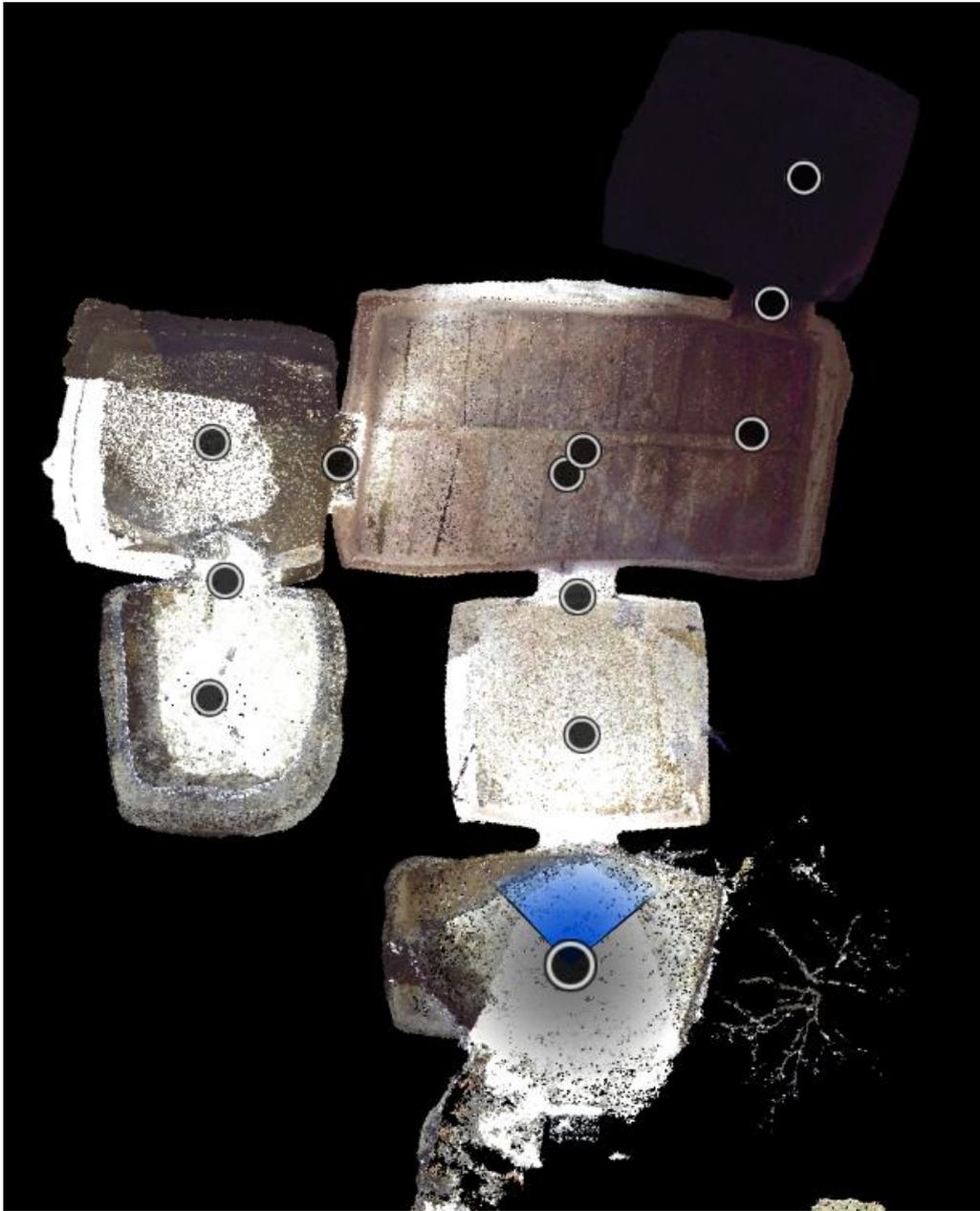
Sezione A-A'



Sezione B-B'



Planimetrie e sezioni.



Posizionamento delle stazioni



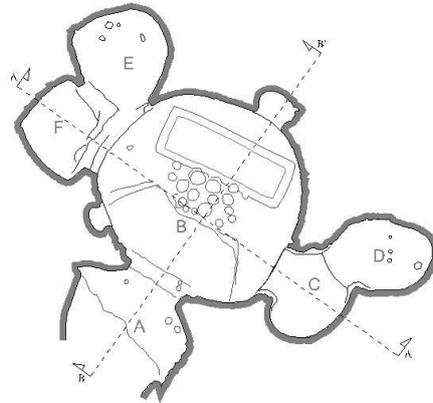
Vista dall'alto del modello SfM



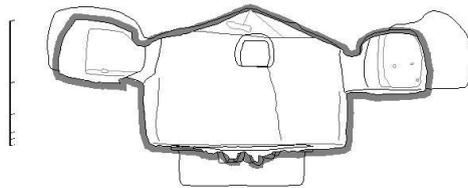
Dettaglio del corniforme da ZScan

Sito	Tomba V della Capanna Sant'Andrea Priu
Comune Località WGS84 Quota s.l.m. Orientamento	Bonorva (SS) Sant'Andrea Priu 40°25'18.65"N 08°50'49.45"E 379 Sud-ovest
<p>Descrizione:</p> <p>La necropoli di Sant'Andrea Priu è composta da 15 ipogei, quasi tutti pluricellulari. Il caso di studio interessa la Tomba V, che riproduce una capanna neolitica. L'ingresso all'ipogeo, che avveniva per mezzo di scalini scavati nella roccia, è attualmente sopraelevato a causa di un distacco della parete rocciosa. È costituito da un grande ambiente sub-circolare ai lati del quale si aprono due nicchie per la deposizione dei defunti. Il pavimento presenta numerose cospicue e presenta manomissioni di epoche successive.</p> <p>Il rilievo</p> <p>Nonostante le piccole dimensioni, la posizione della sepoltura e la sua morfologia hanno richiesto ben quindici scansioni, necessarie per rilevare tutti i dettagli, anche delle ricche decorazioni del pavimento. Per la stessa ragione sono state necessarie 245 immagini per elaborare il modello SfM.</p> <p>Bibliografia</p> <p>TANDA 1985; USAI 2023</p>	

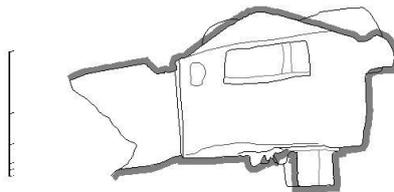
Pianta



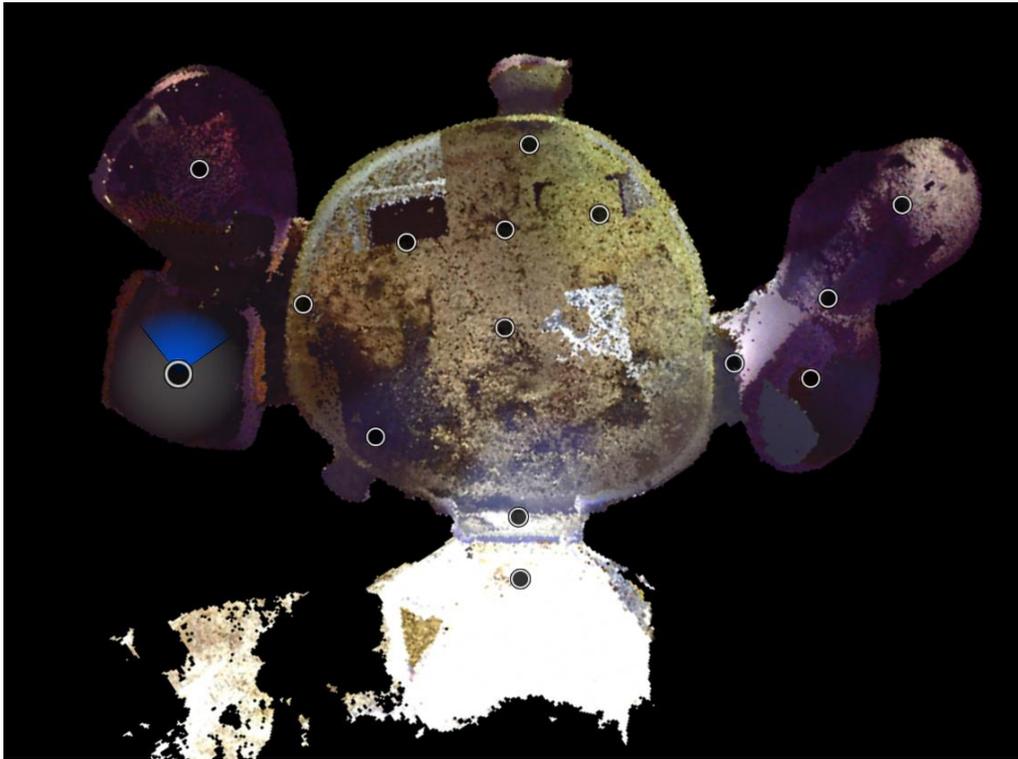
Sezione A-A'



Sezione B-B'



Planimetria e sezioni.



Mapa delle stazioni 3D scanner



Vista sezionata del modello SfM

Resumen Capítulo 7: El levantamiento de los sitios arqueológicos

En el séptimo capítulo se exponen cuatro casos de estudio en los cuales se aplican técnicas de levantamiento tridimensional en los sitios arqueológicos.

El primer caso tratado concierne al levantamiento 3D dirigido al desmontaje y remontaje de una sepultura eneolítica. Esta debía ser retirada del lugar original para su protección y puesta en valor, para luego ser remontada en las instalaciones del ex Regio Museo Archeologico Nazionale de Cagliari. El texto describe las operaciones de levantamiento, desmontaje y remontaje de la sepultura, abordando las dificultades relacionadas con las condiciones ambientales y los espacios reducidos. Se utilizaron tres técnicas de levantamiento: escáner láser terrestre 3D, sistema ZScan y sistema SfM. El levantamiento con escáner láser terrestre 3D fue rápido y produjo una nube de puntos de alta resolución. El sistema ZScan requirió un mayor procesamiento de imágenes, mientras que el sistema SfM fue rápido y eficiente. Las nubes de puntos se alinearon e integraron utilizando *software* dedicado. El reposicionamiento de la sepultura requirió una planificación cuidadosa y el uso de herramientas tradicionales y tecnologías modernas. El conocimiento de las técnicas de levantamiento y construcción tradicionales fue fundamental para el éxito del trabajo. En conclusión, el caso de estudio demuestra la importancia de combinar tecnologías avanzadas con habilidades manuales para la documentación y conservación de los bienes arqueológicos. La tecnología puede mejorar la eficiencia y precisión del trabajo, pero no puede reemplazar la experiencia y el conocimiento del trabajo de campo.

El segundo caso analizado concierne a la restauración del templo nurágico de Domu de Orgia en Esterzili, que representa un excelente ejemplo de cómo la aplicación de tecnologías avanzadas de levantamiento tridimensional puede contribuir significativamente a la conservación y valorización del patrimonio arqueológico. El proceso de restauración fue precedido por un detallado levantamiento tridimensional del monumento, utilizando un escáner láser 3D de tiempo de vuelo, el Menci GS 100, que permitió obtener el levantamiento para la planificación de la intervención. Después de la intervención con un escáner 3D de diferencia de fase Faro Focus 120, se documentaron los cambios realizados durante la restauración, lo que permitió evaluar la efectividad de las intervenciones. El uso de tecnologías

aerofotogramétricas con drones agregó más detalle a la documentación de la intervención, permitiendo una visión general de la estructura y sus relaciones con el entorno circundante. El enfoque multidisciplinario, combinando datos de diversas fuentes y técnicas, permitió una evaluación completa y detallada de la restauración. El levantamiento tridimensional del monumento requirió una planificación cuidadosa y una distribución eficiente de las actividades, involucrando dos días de trabajo y dos operadores especializados. Se recopilaron 17 millones de puntos durante el proceso de escaneo, con una reducción adicional de unos 13 millones de puntos para optimizar el uso de los datos. La fase posterior al levantamiento permitió la alineación de los escaneos y el procesamiento de datos utilizando software especializado como Faro Scene y Autodesk Recap. Este proceso produjo una nube de puntos completa y densa, que se exportó en formato .rcp para la producción de gráficos detallados. Después de la restauración, se realizó un control del estado de conservación del monumento utilizando tecnología aerofotogramétrica a través de drones. Esto permitió comparar los datos obtenidos con los anteriores y evaluar la efectividad de las intervenciones de restauración. La aplicación del levantamiento tridimensional jugó un papel fundamental en la restauración del templo nurágico de Domu de Orgia, permitiendo una conservación precisa y una valorización del patrimonio arqueológico de Esterzili. La combinación de diferentes técnicas proporcionó una visión completa y detallada del monumento, facilitando el proceso de restauración y garantizando un monitoreo efectivo a lo largo del tiempo.

El tercer caso de estudio se llevó a cabo durante la excavación y restauración del asentamiento de la época tardoantigua de Fusti'e Carca en Tertenia, donde se probaron diversas técnicas de documentación en un área de 1300 metros cuadrados con múltiples ambientes y problemáticas. Una de las principales necesidades era procesar rápidamente los datos y verificar la precisión de las adquisiciones. Se emplearon numerosas técnicas de levantamiento: topográfico con DGPS para materializar una red geodésica, escáner láser 3D, aerofotogramétrico con drones para modelos 3D y ortofotos, fotogramétrico con cámara terrestre para levantamientos rápidos, cámara esférica para panoramas de 360 grados y ZScan para mampostería frontalmente alineable. Cada técnica ofreció beneficios

específicos, permitiendo documentar con precisión las unidades estratigráficas y las estructuras. El postprocesamiento de los datos requirió el uso de varios *software* para la gestión e implementación de los datos. La importancia de la documentación exhaustiva se destacó por la necesidad de cubrir el sitio al finalizar los trabajos, lo que hizo imposible corregir cualquier error. El caso de estudio demostró la importancia del uso de tecnologías modernas en arqueología, integrándolas con métodos tradicionales para una documentación completa y precisa.

El cuarto caso de estudio se centró en ocho sepulturas hipogeas (*domus de janas*) para ser incluidas en la candidatura de la UNESCO 2021 "Arte e architettura nella preistoria della Sardegna", en la que se utilizaron tres técnicas de levantamiento diferentes (escáner 3D, SfM y ZScan) para documentar de la mejor manera posible, tanto métrica como fotográficamente, los monumentos candidatos.

8. L'indagine nelle macroaree

8.1. Caso di studio: l'utilizzo di WebGIS, telerilevamento, fotografia e rilievo tridimensionale applicato alla ricerca di recinti e circoli megalitici

Il caso di studio in esame prende spunto dalla scoperta della singolare area megalitica di Tacuara, nel territorio di Nurri (MARCIALIS-ORGIANA 2017), avvenuta nel corso della redazione di una Carta Archeologia Comunale. Nell'individuazione dei siti archeologici si è rivelata fondamentale (oltre alla ricognizione sul campo, alle segnalazioni e alla consultazione del materiale cartografico) la ricognizione aerea, attraverso un'attenta analisi delle foto aeree e satellitari messe a disposizione su diverse piattaforme WebGIS. Da qui la necessità di avviare una ricerca di contesti simili a quello di Tacuara in tutta la Sardegna, sia attraverso le segnalazioni sul *web*, che attraverso il telerilevamento di zone potenzialmente adatte alla presenza di questa classe monumentale. Con il presente caso di studio non si pretende di stilare un catalogo dei circoli e recinti megalitici dell'intero territorio regionale, ma si vuole dare seguito a tale ricerca e porne le basi metodologiche. Sono state svolte, quindi, due tipologie di indagine: una su scala regionale, con informazioni reperite soprattutto *on-line*, una su aree molto vaste ma ben definite, scelte non a caso ma a seguito di un'attenta analisi. Le macroaree in questione si trovano nella Sardegna centro-meridionale e settentrionale, e sono le subregioni del Sarcidano, Trexenta, altopiano di Abbasanta, Barbagia di Ollolai, Sassarese e Anglona. All'interno di queste aree è stata data particolare attenzione alle zone di altopiano (giare e tacchi) e alle zone collinose, gli ambienti pastorali che erano assiduamente frequentate dai costruttori di megaliti (CICILLONI 2012). Questo dato, più volte sottolineato dalle fonti bibliografiche, ha trovato conferma nella ricognizione dei territori di Nurri ed Escolca (Sarcidano): su un totale di 90

chilometri quadrati oggetto di ricognizione e telerilevamento sono stati individuati i circoli megalitici esclusivamente nei margini delle zone di altopiano (in questo caso giare basaltiche). Il dato sembrava trovare ulteriore conferma nel fatto che molti dei circoli megalitici noti alla storia del megalitismo in Sardegna (i già menzionati Is Circuitus, Sa Figu, S'Incorradroxiu, Monte Baranta) si trovano su un altopiano o pianoro. Per questa ragione sono state scelte delle zone dell'isola con caratteristiche geomorfologiche e ambientali potenzialmente favorevoli alla presenza di circoli e recinti megalitici. Le aree in questione sono state indagate da diverse piattaforme WebGIS osservando l'intero territorio e non solo le zone di altopiano, per trovare eventuale conferma o smentita del dato precedentemente descritto. Il telerilevamento ha interessato una superficie di 760 chilometri quadrati in aree in gran parte contigue, che rappresentano il 3% dell'intero territorio regionale, perciò un dato abbastanza significativo per poter formulare delle stime. Dei 760 chilometri quadrati osservati circa il 30% risulta essere ricoperto da una superficie boschiva, che ostacola e rende praticamente impossibile l'individuazione di circoli megalitici dalle foto aeree e necessiterebbe di una ricognizione di superficie o di un telerilevamento con tecnologia LIDAR.

Caratteristiche dei territori indagati

La ricerca a campione attraverso telerilevamento, finalizzata a trovare nell'isola confronti con l'area megalitica di Tacuara, a differenza di quella bibliografica e delle segnalazioni provenienti da varie fonti, è avvenuta in ambiti territoriali ben delimitati, con l'obiettivo di espandersi, in seguito, a tutto il territorio regionale. Sono state scelte delle aree potenzialmente adatte alla costruzione di monumenti megalitici, ovvero le aree di altopiano o che dominano il territorio circostante: il lavoro è iniziato nel Sarcidano (nei territori di Nurri, Orroli, Escolca, Serri), con particolare attenzione alle giare, i tavolati basaltici che caratterizzano quest'area della Sardegna centrale, e ai tacchi calcarei; è proseguito nella Sardegna settentrionale, Anglona e Sassarese, nei comuni di Ploaghe e Chiamonti (dei quali era arrivata anche una segnalazione sulla presenza di

circoli megalitici), sull'altopiano di Abbasanta, nel territorio di Ghilarza e Abbasanta, nel Guspinese e nella Trexenta (Gesico).

Il Sarcidano e l'altopiano di Tacuara

La regione del Sarcidano si estende tra le pendici del Gennargentu e la giara di Gesturi, confinando con le regioni montuose del Gerrei e della Barbagia a Nord e ad Est, con Marmilla e Trexenta a Sud. Comprende una grande varietà di paesaggi, ma ciò che contraddistingue maggiormente il territorio è la presenza delle giare. Nei comuni indagati ha rilevanza l'altopiano di Pranemuru, che domina gli abitati di Nurri e Orroli ed è noto per la presenza del Nuraghe Arrubiu, e le valli del Flumendosa e del Mulargia, i due importanti corsi d'acqua che hanno dato vita agli omonimi bacini artificiali trasformando notevolmente il territorio. L'altopiano basaltico si estende in direzione Sud-Est per circa otto chilometri, degradando dalla punta Pitziogu (761 m) al Tacchixeddu (400 m), con una forte pendenza ai margini ed una coltre basaltica che varia dai 30 ai 100 metri di spessore. L'area è soggetta a fenomeni franosi. La giara di Guzzini si presenta invece come un tavolato basaltico di 4 x 2.5 km, con altitudine media di 600 metri ed un probabile punto di emissione delle lave alla quota di 734 metri. I bordi sono netti e più pronunciati a Nord e Ovest. Domina la zona collinosa che si estende fino al Pranemuru e ha una buona visibilità sulla giara di Serri, il Flumendosa e i monti di Villanova Tulo. Separato dal corpo centrale è situato, a sud, un brandello dell'altopiano a morfologia tabulare, il Tacuara. Questo si estende in direzione Sud per circa 1800 metri, con una larghezza massima di 180 metri ed una altitudine media di 560 metri. Il paesaggio è prevalentemente collinare fino a giungere alla giara di Serri, sulla quale sorge il comune omonimo e che sovrasta gli abitati di Escolca e Gergei. Questa ha un altitudine media di 600 metri e si estende con forma irregolare, in direzione Sud, per circa 4.5 km. Uno stretto passaggio divide la giara in due aree distinte: in quella meridionale sorge l'abitato, in quella settentrionale, più estesa, sorge ai margini il villaggio nuragico di Santa Vittoria di Serri.

Altro elemento che caratterizza il paesaggio sono i tacchi, i cui testimoni più evidenti si trovano nei vicini comuni di Esterzili (Monte Santa Vittoria) e Seulo

(Monte Perdedu). Il tacco di Nurri si estende invece a Nord dell'abitato, tra il Monte Guzzini e il corso del Flumendosa, degradando dai 694 metri di Is Cangialis fino ai 530 di Funtana 'e Pirastu, dando vita a deboli fenomeni carsici (grotta Sutt'e Scracca). I corsi d'acqua più importanti sono, come accennato, Il Flumendosa ed il Mulargia; tutta la rete idrografica della parte sud-orientale dell'area indagata gravita attorno ai due importanti bacini, con una serie di corsi d'acqua e rivoli stagionali che ne alimentano la portata. Tra questi i più importanti sono il Guntruxioni e il Carrulu (tra Nurri e Villanovatulo), e il Reixi, che da Pranemuru scorre verso il Flumendosa; verso il Mulargia scorrono invece il fiume omonimo, il Rio Maiori e il Pitzixeddus. L'altopiano della giara di Serri non è particolarmente ricco di corsi d'acqua, mentre alle sue pendici troviamo i corsi d'acqua (alcuni stagionali) di Gutturu Trigu, Pontiddus, Arrolarxiu.

Il Sassarese

L'area indagata si trova nella Sardegna Nord-occidentale, precisamente tra Logudoro e Anglona, nei comuni di Ploaghe e Chiaramonti. Il territorio di Ploaghe ha una morfologia prevalentemente collinare, con piccoli altopiani di natura vulcanica, calcarea o sedimentaria, che poggiano su una base tufacea. In generale la geomorfologia del territorio è fortemente caratterizzata da tabulati sub-orizzontali con versanti dolci e poco acclivi, delimitati da scarpate o rientranze. Dal punto di vista altimetrico, la zona non presenta rilievi notevoli; i centri di emissione delle colate laviche, abbastanza recenti, sono il Monte Pelao, Monte Santo, Monte Meddaris, Monte San Matteo e Monte Massa, che hanno interessato con direzione Nord-Sud l'intera regione del Logudoro. La stratigrafia geologica della regione può essere riassunta fondamentalmente in quattro fasi: le vulcaniti oligo-mioceniche (trachiti e andesiti), che sono costituite da tipi litologici variabili per composizione mineralogica e chimica; le sedimentazioni lacustri, con tufi di colore bianco-grigiastro spesso pomicei; le formazioni marine del Miocene medio, con arenarie gialle o grigie in giacitura orizzontale; vulcaniti plio-pleistoceniche, che hanno dato origine al Monte San Matteo, a nord di Ploaghe, e al Monte Meddaris. L'area di Chiaramonti si presenta più varia per altimetria e morfologia. La zona più montuosa è situata a

Sud, lungo il costone che divide il territorio di Chiaramonti da quello di Ozieri: il massiccio del Monte Sassu ha una configurazione multiforme, con i punti più elevati variano dai m. 559 del Monte Elighia a m. 640 di Punta di Pittia. Il territorio è fortemente caratterizzato alla presenza del vasto altopiano, che si estende per circa 4.5 x 4 km, che abbraccia almeno un quinto del territorio comunale e ha un'altitudine media di 400 metri.

L'altopiano di Abbasanta

L'enorme tabulato, che si estende a un'altitudine media di 300 m sulla destra del medio corso del fiume Tirso, è compreso tra la catena del Marghine, il Montiferru e il Campidano di Oristano. Costituito da rocce basaltiche, è leggermente inclinato verso sud-est, mentre a est strapiomba sulla valle del Tirso. Principali centri sono Abbasanta, Sedilo, Ghilarza e Paulilatino. Il paesaggio, di carattere pastorale, è fortemente antropizzato fin dalla preistoria; assume, oggi, quelle caratteristiche che sono tipiche degli altopiani della Sardegna centrale, ovvero la varietà di paesaggi (bosco di querce, pascolo brado e, a tratti, cerealicoltura) e la suddivisione del territorio in tanche con muratura a secco. La presenza del Tirso e dei suoi affluenti caratterizza fortemente la morfologia e l'economia del territorio.

La Trexenta (Gesico)

Il territorio di Gesico si estende nella parte settentrionale della Trexenta, in un'area collinosa formatasi a seguito del deposito di marne, talora con selce, che è tipica di questa subregione compresa tra il Sarcidano e il Campidano. Fortemente caratterizzato dall'attività agricola, in particolare dalla cerealicoltura, trova nel Monte san Mauro (501 metri) il rilievo più importante, sia da un punto di vista geomorfologico che culturale, data la presenza dell'omonimo santuario e di importanti manifestazioni della preistoria sarda.

Guspini

Il territorio di Guspini sorge nella regione del Medio Campidano, ai piedi della catena del Monte Linas. Ha un'estensione di 174 km quadrati e un'altitudine

che varia da 0 a 750 metri s.l.m.; l'ambiente è vario e ricco di tratti caratteristici sia dal punto di vista faunistico che botanico. In tutto il territorio domina la macchia alta a corbezzolo, erica, viburno, leccio e sughera, mentre in prossimità degli alvei dei corsi d'acqua sussistono formazioni a ontano nero, oleandro e salice bianco. Dal punto di vista geologico, particolare interesse riveste una caratteristica formazione basaltica, nella collina di Cuccureddu 'e Zeppara (167 metri s.l.m), un piccolo cono basaltico di origine vulcanica. Il rilievo, formatosi nel miocene (3-12 milioni di anni fa), fu in passato interessato da attività estrattive ancor oggi visibili nei versanti del rilievo. L'area risulta fortemente antropizzata, e porta con sé i segni dell'intenso sfruttamento minerario.

Piattaforme WebGIS e materiale cartografico consultato

La diffusione dei WebGIS nell'ultimo ventennio ha notevolmente agevolato la ricerca archeologica attraverso il telerilevamento, mettendo a disposizione dell'archeologo una enorme quantità di dati continuamente aggiornati, di facile e accesso, consultabili e utilizzabili gratuitamente o a costi contenuti. In questo lavoro si è deciso di utilizzare più di una piattaforma WebGIS per diverse ragioni: rigore scientifico, necessità di confrontare più fonti cartografiche e fotografiche, semplicità di utilizzo di una piattaforma rispetto ad un'altra, diverse tipologie di dati ricavabili dai database, possibilità di consultare immagini storiche. Ai database informatici si aggiungono le informazioni sempre utili provenienti dalla cartografia tradizionale: carte storiche, mappe catastali, cartografia IGM (consultabile *on-line*), foto aeree provenienti da archivi comunali e regionali. Di seguito sono indicate le fonti cartografiche consultate:

*Google Maps*⁴²: è il WebGIS ormai più diffuso al mondo, consultabile direttamente dal browser di un qualsiasi PC, tablet o smartphone. Le immagini satellitari hanno talvolta una qualità inferiore rispetto ai concorrenti ma vengono aggiornate più velocemente che in qualsiasi altro WebGIS gratuito. Offre la possibilità di delimitare aree di interesse, inserire segnaposto e schede

⁴² <https://www.google.it/maps>

descrittive, condividere informazioni con altri utenti ed esportare file in coordinate geografiche per poi caricarli su dispositivi portatili e renderne più semplice la ricerca sul terreno. Un difetto di *Google Maps* è che non sono presenti ortofoto, ossia le immagini sono schiacciate per essere adattate alla proiezione cartografica (usa infatti la proiezione di Mercatore). Ciò diviene evidente quando le immagini vengono confrontate con quelle dell'Istituto Geografico Militare o del Geoportale Nazionale. Un servizio supplementare offerto da Google è lo *Street View*, che permette di visualizzare da numerosi punti, posti lungo le principali vie di comunicazione, immagini a 360°. Il servizio si è rivelato molto utile in quei casi che vedevano il sito da indagare a breve distanza dalla strada.

Google Earth Pro: è la versione avanzata di *Google Maps*. Non può essere consultato direttamente dal browser se non dopo aver eseguito l'installazione di un software sul proprio PC. Rispetto alla versione *Maps* offre in più la possibilità di estrarre i dati sull'elevazione, visionare il territorio in 3D con una buona risoluzione del modello digitale del terreno, misurare distanze e aree, salvare immagini ed estrarre DEM (Modelli digitali del terreno) se interfacciato con altri software.

*Bing Maps*⁴³: è il principale concorrente di *Google Maps/Earh*. Ha funzioni simili a Google ma è meno pratico nell'utilizzo. In compenso offre immagini, in alcuni casi, di qualità superiore e una vista panoramica di grande utilità.

*Geoportale nazionale*⁴⁴: permette la visualizzazione gratuita e l'utilizzo della cartografia nazionale di base con un sistema di semplice e di rapido utilizzo. La cartografia è organizzata per livelli (*layers*) e permette di confrontare immagini e carte di uno stesso sito semplicemente attivando o disattivando i vari livelli. I metadati sono suddivisi in immagini e vettoriali. Di seguito quelli utilizzati: Carta IGM 1:25.000, Ortofoto bianco/nero 1988/1989, ortofoto bianco/nero 1994/1996, ortofoto colore, dalle più vecchie alle più recenti, per le immagini; carta geologica per il vettoriale.

⁴³ www.bing.com/maps

⁴⁴ <http://www.pcn.minambiente.it/GN>

*Sardegna Mapped*⁴⁵: servizio di consultazione delle mappe offerto dalla Regione Sardegna tramite visualizzatore on-line, molto utile per il reperimento di immagini storiche; sono infatti caricati i seguenti database: Ortofoto 2006, 2003, 2000, 1977, 1954.

Al materiale cartografico consultabile con l'utilizzo dei WebGIS si aggiunge la cartografia tradizionale: Carta Tecnica Regionale (C.T.R) della Regione Sardegna in formato dwg; mappe catastali in formato cartaceo o dwg. Per l'elaborazione delle carte illustrative del presente lavoro è stato invece utilizzato il software Autodesk Civil 3D⁴⁶.

Telerilevamento

Individuate le aree da indagare è sembrato opportuno suddividere il territorio in quadranti, per avere un riferimento certo in futuro e per rendere i dati facilmente condivisibili. Poiché i WebGIS non offrono questa possibilità si è scelto di utilizzare i quadranti forniti nel quadro d'unione della Carta Tecnica Regionale (CTR) in scala 1:10.000 della Regione Sardegna, disponibile in rete in formato .pdf. Sono stati indagati i seguenti quadranti: 540030, 540060, 540070, 540080, 540100, 540110, 540120, 540130, 540150, 460060, 460100, 459130, 459160, 480070, 499050, 515100, 529120, 538160, 548040 (Fig. 78).

Scelto il quadrante da osservare è iniziata la ricerca sulle immagini satellitari con l'utilizzo di un PC collegato ad almeno due monitor, il primo necessario per l'osservazione del WebGIS ed il secondo per la visualizzazione della CTR. Di fondamentale importanza è stata la scelta dei software, in particolare per l'elaborazione dei dati cartografici. I software utilizzati sono i seguenti: un *browser* a scelta tra i più diffusi; nel caso specifico è stato utilizzato Google Chrome; Google Earth Pro; Autodesk Civil 3D (la scelta del software cartografico si basa sulle esperienze professionali dello scrivente; Civil 3D è un software a pagamento disponibile in una versione per studenti che offre svariati vantaggi rispetto ai concorrenti, in particolare ArcGis, o a software *Open Source*

⁴⁵ www.sardegna.territorio.it/webgis/sardegnamappe

⁴⁶ Nell'utilizzo del GIS della casa Autodesk è stato fondamentale l'ausilio del manuale di Gabriele Congiu: *AutoCad Map 3D: cartografia dal CAD al GIS* (CONGIU 2010).

come Quantum GIS; tali vantaggi si riscontrano in particolare nella possibilità di gestire con un solo *software* i dati cartografici provenienti dalle piattaforme più diffuse e i disegni eseguiti dai rilievi con 3D Laser Scanner, nonché di modificare e aggiornare la cartografia in tempo reale).

Sul quadrante della CTR si individua una strisciata con andamento Nord-Sud, con una larghezza che varia, in base alla morfologia del terreno, dai 500 ai 1.000 metri. Le strisciate, una volta indagate, vengono evidenziate sulla carta. I WebGIS osservati sono nell'ordine Bing Maps, Google Earth, Geoportale Nazionale (che comprende le carte IGM), Sardegna Mappe. Quando si individua un presunto sito megalitico vengono posti un simbolo sulla CTR in Civil 3D e uno su Google Earth. Le carte IGM risultano sempre molto utili in quanto i circoli megalitici possono essere confusi con le rovine dei nuraghi o indicati come rovine generiche; pertanto, le aree che recano tali simboli sono state osservate con particolare attenzione. Le carte catastali, quando disponibili in formato cartaceo o digitale, sono invece fondamentali per la toponomastica e la nomenclatura dei siti inediti.

Con l'utilizzo di Bing Maps su un monitor è possibile osservare con buona risoluzione un'area di 0.25 ettari, ovvero di 50 x 50 metri, che rappresenta il fotogramma base della ricerca; pertanto, una strisciata con larghezza di 500 metri sulla CTR implica l'analisi di 1.000 fotogrammi.

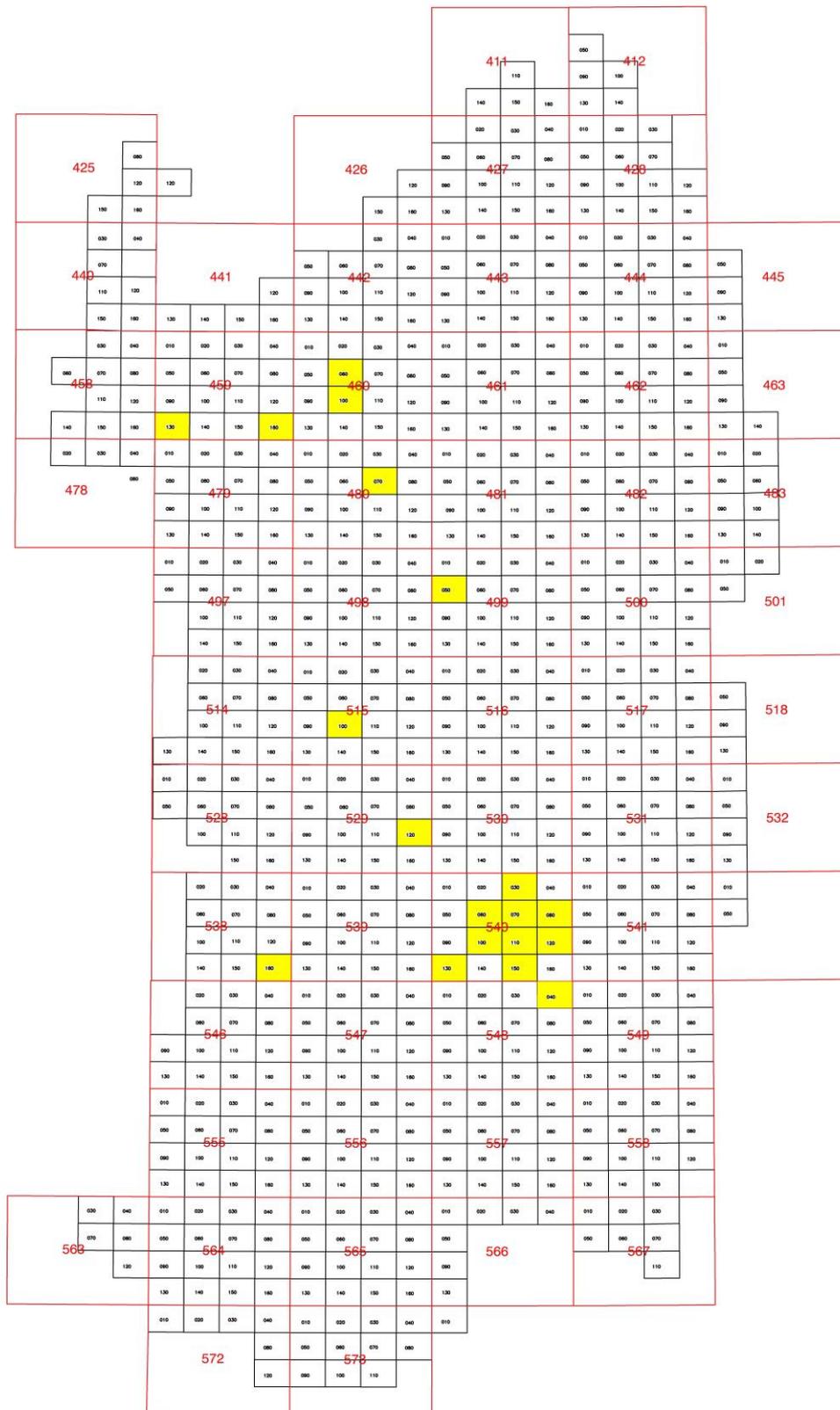


Fig. 78 - Quadranti indagato della CTR Sardegna.

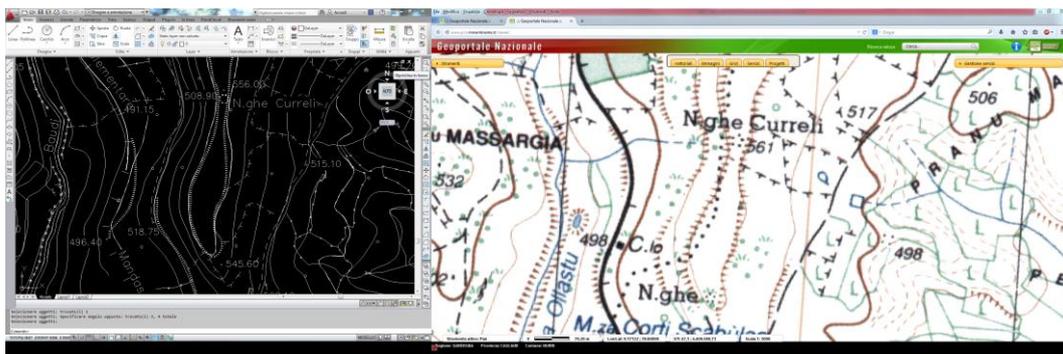


Fig. 79 - Quadranti indagato della CTR Sardegna.

Apporto della toponomastica

Il contributo della toponomastica alla ricognizione archeologica può rivelarsi, talvolta, fondamentale, ancor più se è possibile consultare testi o ricerche di studiosi che si sono occupati in maniera approfondita dei territori oggetto d'indagine⁴⁷. Quando si tratta di macroaree, come nel nostro caso, risulta sempre importante l'apporto della cartografia, in particolare IGM, CTR e catastale⁴⁸ (Fig. 79). Il Geoportale Nazionale⁴⁹ permette di ricercare i toponimi, visualizzare le immagini satellitari e, contemporaneamente, le carte IGM. La Regione Autonoma della Sardegna mette a disposizione nel suo WebGis la possibilità di consultare un database di toponimi (tratti in gran parte dalla cartografia ufficiale) e di effettuare la ricerca per nome, località e tipologia⁵⁰. La ricerca per nome permette di individuare il comune in cui si riscontra la presenza del toponimo e, cosa molto utile, i toponimi che risultano simili: cercando, ad esempio, il toponimo *perda* (pietra) tra i risultati si otterranno nomi

⁴⁷ Per il territorio di Nurri è risultato particolarmente utile il lavoro di Oliviero Nioi: *Logus, microtoponimi di Nurri* (Nioi 2007). Sono pochi, purtroppo, i comuni sardi oggetto di una catalogazione sistematica dei toponimi: un enorme patrimonio linguistico e culturale che rischia di andare in parte perduto.

⁴⁸ I toponimi sono spesso riportati sulle carte con errori di trascrizione o differenze da una raccolta cartografica ad un'altra. Da questo punto di vista sono sembrate più affidabili le carte catastali, spesso redatte da tecnici del territorio che hanno maggiore confidenza con la variante linguistica del luogo.

⁴⁹ www.pcn.minambiente.it/viewer

⁵⁰ webgis.regione.sardegna.it/ricercatoponimi

di luogo non attinenti (*Pedru* o *Perdu*) e nomi attinenti (*pedra*, *pelda*, *etc.*). Inserendo un filtro tipologico è possibile limitare il numero dei risultati escludendo a priori quelli di scarso interesse. Riscontrata la presenza di un toponimo interessante è possibile connettersi direttamente al navigatore per visualizzare l'immagine satellitare. Nel caso dei circoli megalitici la ricerca sulla toponomastica è avvenuta su una serie di nomi limitata, che richiamano alla forma (*circu*, *chircu*, *cirquittu*, *chirciu*, *criccu*, *ingiru*), all'uso in epoca storica e moderna dei circoli per il ricovero del bestiame (*accorru*, *accorradordzu*, *accorradroxiu*, *corti*), al materiale da costruzione (*pedras fittas*, che può indicare la presenza di menhir, *perdas ladas*, *perdas longas*). Esistono in Sardegna una serie di raccolte di toponimi curate da linguisti contemporanei, che hanno fornito informazioni molto utili a riguardo. Gli stessi autori associano tali toponimi alla presenza di emergenze archeologiche.

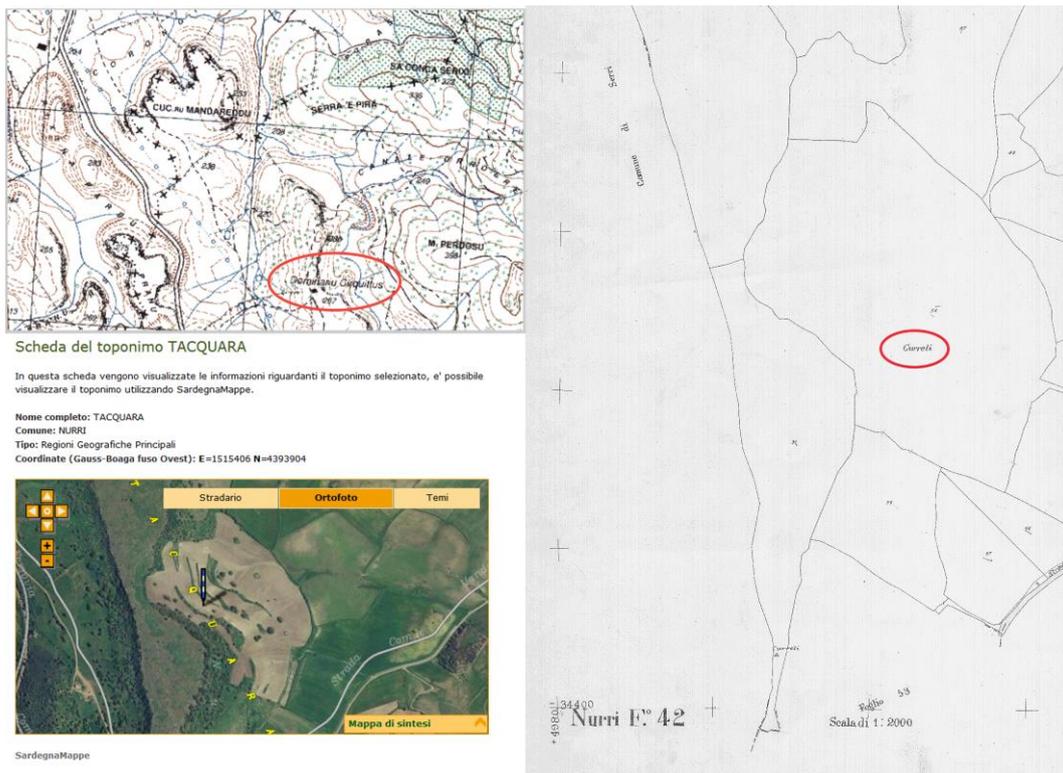


Fig. 80 - Ricerca di metadati su WebGIS.

Ricognizione

Tutti i siti individuati tramite telerilevamento, data l'impossibilità di constatarne la veridicità dalle immagini aeree o satellitari per la non sufficiente risoluzione, sono stati oggetto di verifica sul campo. Nel caso di più siti in un'area delimitata è stato possibile pianificare un percorso su Google Earth, verificando preliminarmente le vie di accesso e le distanze da percorrere in auto o a piedi, la presenza di ostacoli, l'uso del suolo, la pendenza del terreno: tali operazioni preliminari hanno consentito un notevole risparmio di tempo. Per la successiva individuazione in campagna le coordinate dei punti d'interesse, con proiezione planare WGS84 fuso 32, sono state salvate su un palmare Nautiz X7 prodotto dalla Handheld con ricevitore GPS integrato di tecnologia Sirf III, che in condizioni di rilievo ottimali offre una precisione di circa 1 metro e risulta molto pratico nel suo utilizzo per le ridotte dimensioni; per la battuta precisa del punto è stato utilizzato unitamente al palmare un ricevitore di tipo differenziale Topcon HiperPro con precisione centimetrica, collegato alla rete nazionale NetGeo (Fig. 81).

I software topografici, della casa Topcon, sono Meridiana e Mercurio. Il software Meridiana è necessario per unire i dati provenienti dal WebGIS con i dati provenienti da Autocad e per elaborare l'area da indagare. Mercurio è invece il software caricato sul palmare che permette la visualizzazione e l'individuazione dei punti in campagna. Come spesso accade, l'individuazione dei siti sul terreno richiede grande dispendio di tempo ed energie, unite spesso alla difficoltà di raggiungere località lontane dalle vie di comunicazione o in terreni di proprietà privata che non si possono attraversare senza il consenso dei proprietari. A questo si è aggiunta la constatazione di aver individuato, talvolta, non un *cromlech* ma un recinto per il bestiame di epoca moderna. La ricognizione permette di raccogliere dati sull'effettivo stato di conservazione del circolo megalitico, l'eventuale riutilizzo in epoca moderna, la presenza di altri circoli, la manomissione con lo spostamento dei massi dalla posizione originaria, l'attuale uso del suolo, la visibilità sul territorio circostante, la presenza di materiali o di elementi culturali (coppelle, incisioni).



Fig. 81 - DGPS nelle fasi di rilievo di un circolo di pietre.

Rilievo fotografico

Per il rilievo fotografico è stata utilizzata una fotocamera reflex Canon Eos 400D con tre diversi obiettivi: un'ottica zoom 18/55, un'ottica 60mm per le macro (nel caso di coppelle o incisioni sugli ortostati o nei pressi dei *cromlech*), un'ottica 24mm per le immagini panoramiche. Talvolta la vegetazione ha reso difficoltosa la buona riuscita del rilievo fotografico, impedendo di scattare delle immagini di ottima qualità. Si è in parte ovviato a questa difficoltà montando la fotocamera, munita di scatto remoto, su un'asta topografica lunga 4 metri e collegandola ad un tablet pc per visionare l'immagine a terra. Questo ha permesso di fotografare dall'alto i circoli, rendendo più chiara l'immagine per il lettore.

Rilievo tridimensionale

Il rilievo dei circoli megalitici è avvenuto con l'utilizzo di un laser scanner a differenza di fase Faro Focus 3D, che dato il peso ridotto (5 kg) e la velocità elevata di scansione (fino a 900.000 punti/secondo) ha notevolmente agevolato i tempi della restituzione grafica (Fig. 82). La fotocamera integrata permettere di aggiungere ai campi *xyz* i valori del colore (RGB) per ogni singolo punto rilevato. Il software è necessario per definire l'area da rilevare e visualizzare su un piccolo monitor LCD l'anteprima del rilievo, constatandone nell'immediato la buona riuscita. In genere sono state necessarie quattro stazioni di presa per ogni circolo megalitico (una dall'interno e tre dall'esterno); il rilievo necessita dell'ausilio di sfere topografiche in polistirolo (georiferite con ricevitore GPS). In alcuni casi è stata riscontrata la presenza di coppelle, rilevate con strumentazione ZScan della Menci Software.



Fig. 82 - 3D laser scanner: rilievo di un circolo di pietre.

Trasferimento dei dati ed elaborazione CAD e GIS

I dati provenienti da laser scanner necessitano di vari passaggi prima di essere utilizzati per il disegno delle tavole di rilievo. Il dato acquisito con laser scanner

è infatti definito “dato grezzo”, poiché il primo risultato è una nuvola di punti (*point cloud*), che non possiede il dato relativo al colore e necessita di un “filtraggio”, un’elaborazione che permette di eliminare i punti non necessari al disegno grafico. Queste operazioni sono state eseguite con il software Faro Scene, prodotto dalla stessa casa costruttrice del laser scanner. Le nuvole di punti ottenute devono essere georiferite e semplificate se hanno creato file troppo pesanti, quindi difficili da gestire. Tali operazioni avvengono con il software Trimble Real Works Survey, che permette inoltre di fare sezioni sui modelli ottenuti e di esportare i punti in formati (.ptc e .pcg) condivisibili con Autodesk Civil 3D. I punti importati in Civil 3D vengono quindi utilizzati come se fossero delle immagini da vettorizzare, sulle quali disegnare le sezioni e le planimetrie.

Risulta più difficoltosa l’elaborazione dei rilievi con il sistema Menci ZScan. Le triplette di immagini acquisite vengono caricate sul software Zscan che, inseriti i punti di presa utilizzati nella slitta graduata, produce la nuvola di punti o il modello triangolato della zona interessata. Le nuvole di punti ottenute vengono poi esportate sul software ZMap per i filtraggi e la registrazione. Da qui il passaggio su Real Works Survey per unirle con il modello completo del circolo megalitico.

L’elaborazione del GIS è avvenuta ugualmente su Autodesk Civil 3D. Propedeutico all’analisi GIS è naturalmente il rilevamento dei siti con l’ottenimento delle coordinate (sia con strumentazione GPS che con lo studio della cartografia) per l’elaborazione dello *Shapefile*, un file che contiene una serie di informazioni, non solo geografiche, sui siti che vengono utilizzati nell’indagine. L’elaborazione dello *Shapefile* è avvenuta con il software GeoPro Meridiana, che ha permesso di creare una tabella contenente coordinate, tipologia, inquadramento cronologico, descrizione di ogni singolo sito. I dati inseriti, una volta esportati, possono essere caricati sul GIS e proiettati sulla cartografia con tematismi associati ai metadati.

I punti rilevati con GPS sono stati proiettati sulle mappe scaricabili dal sito della Regione Sardegna in formati vettoriali e raster. La scelta della cartografia di base dipende dalle finalità del GIS (MARINI 1998). I DEM (*Digital Elevation*

Model) sono delle tavole *raster* che permettono al software di elaborare, sulla base dei dati contenuti nei singolo pixel che le compongono, dei modelli tridimensionali del terreno; il TIN (*Triangular Irregular Network*) è invece una rete di triangoli che costituiscono una superficie tridimensionale, la cui vicinanza alla realtà dipende dalla densità dei vertici.

Monumenti individuati

Sito	Circolo megalitico Sa Ortija
Comune Località Denominazione Sito Classe monumentale: WGS84 Gauss Boaga Quota s.l.m. Quadro CTR Fiume a metri Idrografia Sorgente a m Morfologia Geologia Uso del suolo Materiale Orientamento Stato di conservazione Cronologia: Documentazione fotografica: Documentazione grafica: Elementi culturali:	Chiaramonti (SS) Sa Ortija Sa Ortija Area sacra Circolo megalitico 40°42'04.81"N, 8°49'15.94"E 4505632.88 N, 1484916.08 E 460.060 460 Riu Polcalzos, Riu Simeone, Riu Conca 'e Fossu, Riu Badu Ebbas 1.500 Collinare R1 - Detriti, depositi alluvionali e fluviolacustri, spiagge attuali (Olocene) Sughereto, pascolo Basalto Non rilevabile Buono III-II millennio a.C. Foto digitali a colori Pianta, 3D Coppelle
<p>Come raggiungere il sito:</p> <p>Dalla SP 68, che collega Ploaghe a Chiaramonti, si imbecca, a circa 6,5 chilometri dall'uscita di Ploaghe, una strada sterrata, che attraversa con un sottopassaggio la SS 672 Sassari – Tempio. Si procede lungo la strada sterrata per 2,5 chilometri all'interno di una proprietà privata (per accedere è necessario il consenso dei proprietari). Il circolo megalitico è visibile sul lato sinistro a pochi metri dalla strada e all'interno di un'area recintata.</p>	
<p>Esplorazioni scientifiche e/o scavi:</p> <p>Il sito non è stato oggetto di indagini archeologiche.</p>	

Descrizione:

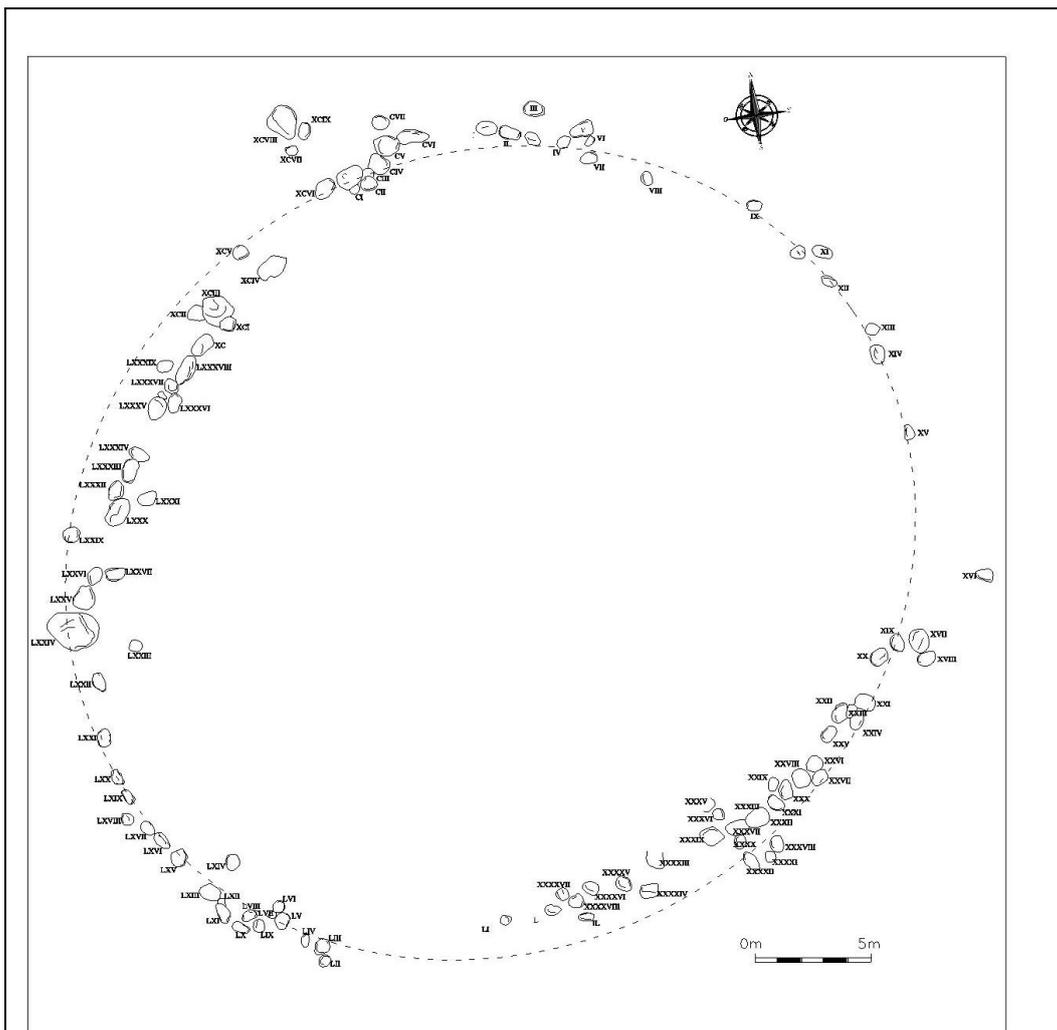
Il monumento si trova in un'area pianeggiante delle campagne di Chiaramonti, su una superficie privata adibita a sughereto e al pascolo ovino. La località, dalla quale prende il nome, è infatti denominata Sa Ortija. Il circolo megalitico, in buono stato di conservazione, non sembra aver subito importanti modifiche rispetto all'impostazione originaria; la forma è ellissoidale, con un asse maggiore di 37.52 metri, asse minore di 34.21 metri e perimetro che si sviluppa per un totale di 56,36 metri ed occupa una superficie di 1008 mq. I 106 blocchi che lo compongono hanno forma pressoché globulare, sono disposti in maniera continua, e hanno dimensioni variabili. Il blocco più evidente è il LXXIV, che ha un'altezza di 1,08 metri ed una larghezza di 2,22 metri. L'area di cava si trova nelle vicinanze e non è da escludere la presenza di altri circoli megalitici di minori dimensioni, difficili da rilevare a causa della vegetazione.

Monumenti vicini: Nuraghe Eru, Nuraghe Mannu, Nuraghe S. Ainzu, Nuraghe Saucos, Nuraghe Su Caddalzu, Nuraghe Su Crastu Covaccadu, Nuraghe Alzola de Coghalzos, Nuraghe Scobertu.

Bibliografia: MARCIALIS 2020



Coppelle scavate nei blocchi basaltici



Planimetria



Fasi di rilievo

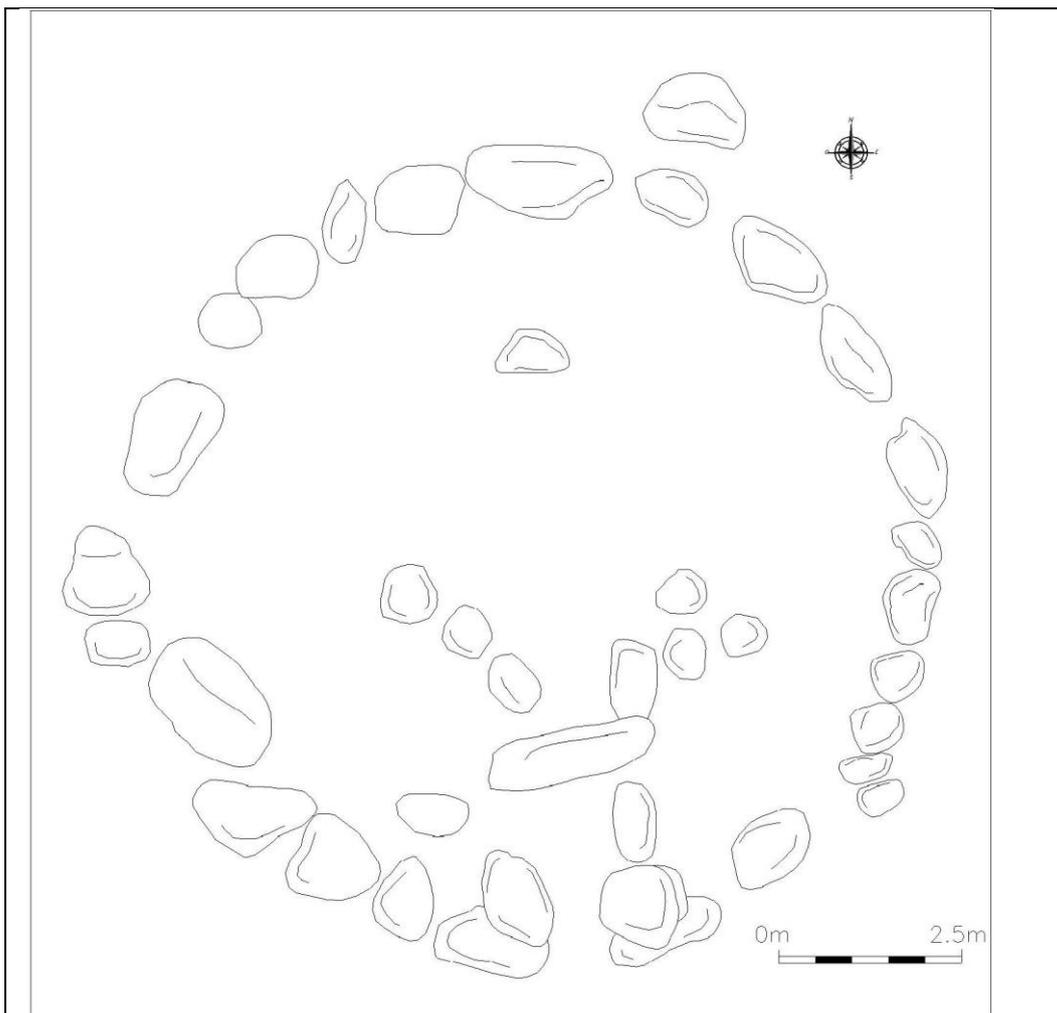
Sito	Circolo megalitico Su Sassu
Comune Località Denominazione Sito Classe monumentale WGS84 Gauss Boaga Quota s.l.m. Quadro CTR Fiume a metri Idrografia Sorgente a m Morfologia Geologia Uso del suolo Materiale Orientamento Stato di conservazione: Cronologia: Documentazione fotografica: Documentazione grafica: Elementi culturali:	Ploaghe (SS) Su Sassu Su Sassu Area sacra Circolo megalitico 40°40'59.37"N, 8°48'23.68"E 4503415.9193 N, 1483679.4730 E 359 460.100 260 Rio Ena de Pruna, Rio Fundidu, Rio Badde Pittiris 750 Tabulare B7_Riodaciti, rioliti (lave, ignimbriti) (ciclo miocenico-paleogenico) Pascolo, rado bosco di sughere Basalto Continuo con ingresso monumentale Buono III-II millennio a.C. Foto digitali a colori Pianta Coppelle
<p>Come raggiungere il sito:</p> <p>Dall'incrocio della SS 672 con la SP 68 imboccare la strada vicinale in località Serra Maniales, dopo circa 400 metri svoltare a destra, e ancora a destra dopo 1 chilometro; percorrere la strada sterrata per altri 500 metri: il circolo megalitico, visibile dalla strada, si trova all'interno di un tancato nelle vicinanze di un sughereto.</p> <p>Descrizione:</p> <p>Il monumento non è segnalato su alcuna cartografia né in bibliografia. La sua circonferenza è ben visibile dalle immagini del Geoportale Nazionale e da Bing Maps. Il sito, interessato dalla presenza di un rado bosco di sughere e adibito al pascolo, non ha subito arature tali da manomettere gravemente la struttura. L'area è particolarmente ricca di testimonianze di epoca nuragica,</p>	

come dimostra la presenza di sette nuraghi nel raggio 1 km. La struttura ha una circonferenza esterna di 38,13 m, interna di 29,30 m, con un diametro medio di 10,30 m. L'ingresso, rivolto a Sud, ha una larghezza massima di 0.85 m e la particolarità di aprirsi ad un piccolo ambiente quadrangolare, una sorta di vestibolo, che da un'altra apertura (larga sempre 0.85 m e rivolta ad Ovest) porta all'interno del circolo; ha un aspetto che si può definire monumentale, con due grossi blocchi sovrapposti per lato che costituiscono gli stipiti e altri due ortostati disposti ad L che delimitano il vano quadrangolare, uno sul lato destro ed uno frontalmente all'ingresso. Gli ortostati che compongono la circonferenza del circolo sono 30, compresi quelli dell'ingresso monumentale. L'ortostato IV è il più alto, con 1.10 m dal piano di campagna, lo stipite destro misura invece 1.26 m. Nei massi del circolo ed in quelli sparsi nell'area sono presenti numerose coppelle.

Monumenti vicini: Nuraghi: Ena 'e Pruna, Annaju, Polcalzos, Sa Cobesciada, Saucos, Su Covaccadu, Serra Urvine.



Veduta da est



Planimetria



Vista dall'alto (Geoportale Nazionale)

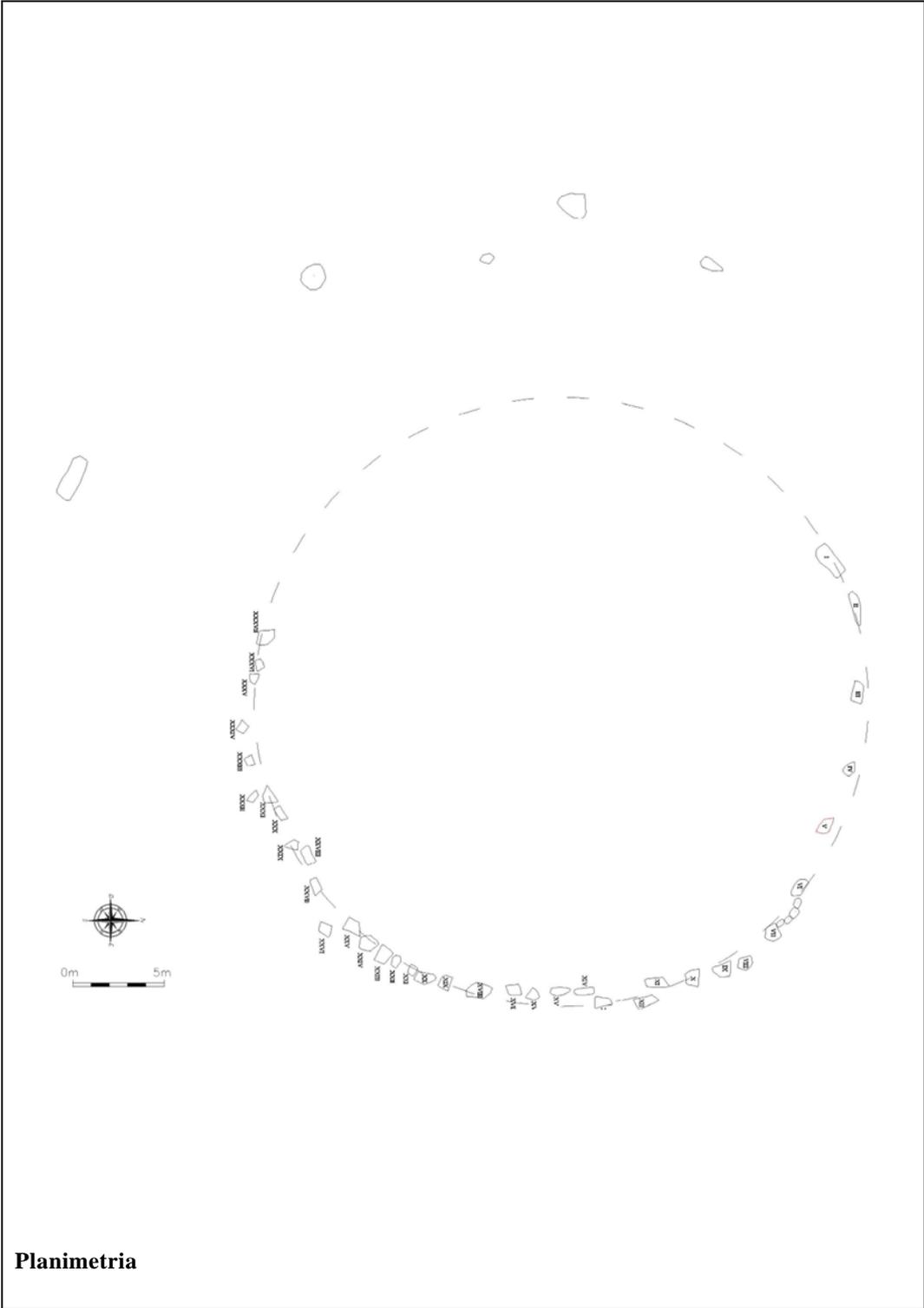
Sito	Circolo megalitico Sa Lendinosa
Comune Località Denominazione Sito Classe monumentale WGS84 Gauss Boaga Quota s.l.m. Quadro CTR Fiume a metri Idrografia Sorgente a m Morfologia Geologia Uso del suolo Materiale Orientamento Stato di conservazione: Cronologia: Documentazione fotografica: Documentazione grafica: Elementi culturali:	Illorai (SS) – Orotelli (NU) Sa Lendinosa Sa Lendinosa Area sacra Circolo megalitico 40°18'38.15"N, 9°02'26.11"E 4462245.88 N, 1503478.86 E 178 499.050 90 Fiume Tirso, Riu su Pisanu, Riu Urbarutta, Riu Giuncargiu 400 Collinare R4 - Detriti, alluvioni terrazzate, fluviolacustri e fluvioglaciali (Pleistocene) Seminativo, pascolo Tufo Non rilevabile Buono III-II millennio a.C. Foto digitali a colori Pianta Non riscontrati
<p>Come raggiungere il sito:</p> <p>Dalla SS 131 prendere l'uscita per Ottana e percorrere la SP 17 per circa 6 chilometri, fino all'uscita per Bolotana. Percorrere la SP 33 per 6 chilometri, svoltare sulla destra fino a giungere al cancello di una proprietà privata. Il monumento si trova a 250 metri in direzione Nord-Est.</p> <p>Descrizione:</p> <p>Il monumento si trova al confine tra i territori di Illorai e Orotelli, nei pressi della borgata di Molia, a soli 90 metri dalla sponda occidentale del fiume Tirso, su un'area riparata da un costone tufaceo alto 12 metri. Il terreno, con una leggera acclività verso il fiume, è di proprietà privata e adibito prevalentemente al pascolo e alla coltivazione di foraggio. Il monumento non</p>	

sembra aver subito modifiche in epoca moderna; la porzione occidentale della circonferenza è parzialmente interrata, tanto da non poterne seguire per intero l'andamento. Il diametro è di 33,71 metri, con una circonferenza quasi perfetta di 105,91 metri (visibile per un tratto di 66 metri) ed un'area di 982 mq. Gli ortostati, molti ancora nell'originaria posizione verticale, sono 37, disposti a tratti in maniera continua. L'ortostato V è il più alto (1,30 metri). Altri blocchi presenti nell'area circostante potrebbero essere riconducibili al monumento.

Altri monumenti vicini: Terme Bagni Oddini, necropoli Molia, Nuraghe Lozzue, Nuraghe Attetu



Veduta dei blocchi in fase di rilievo





Vista dall'alto (Google Earth)

Sito	Circoli megalitici di Ausadù
Comune Località Denominazione Sito Classe monumentale WGS84 Gauss Boaga Quota s.l.m. Quadro CTR Fiume a metri Idrografia Sorgente a m Morfologia Geologia Uso del suolo Materiale Orientamento Stato di conservazione: Cronologia: Documentazione fotografica: Documentazione grafica: Elementi culturali:	Ghilarza (OR) Ausadù Ausadù Area sacra Circolo megalitico 40°03'05.46"N, 8°49'37.55"E 4433502.84 N, 1485282.18 E 235 515.100 150 Riu Marcu, Riu Marigosa, Fiume Tirso; ruscello a m 150 Altopiano B5 - Basalti alcalini, trachibasalti (lave, piroclastiti) (ciclo quaternario) Pascolo Basalto Non rilevabile Mediocre III-II millennio a.C. Foto digitali a colori Pianta, 3D Ossidiana, ceramica storica
<p>Come raggiungere il sito:</p> <p>Dalla SP23 si imbecca la SP11 Paulilatino-Busachi, in direzione Paulilatino. Dopo aver percorso 1750 metri si procede per una strada sterrata per circa 80 metri. Il sito, che ha un'ottima visibilità sulla piana circostante, si trova in cima ad un basso rilievo, in direzione Est, a 100 metri dalla strada sterrata e a breve distanza dal traliccio che sorregge i cavi della linea elettrica.</p> <p>Descrizione:</p> <p>Il sito di Ausadù (toponimo indicato nelle mappe con "Ausadu"), si trova circa 3 chilometri ad ovest del fiume Tirso e dell'attuale lago Omodeo, nell'area sud-orientale dell'altopiano di Abbasanta. L'altura, nonostante la modesta elevazione, ha un'ottima visibilità su gran parte dell'altopiano, limitata sullo sfondo dalla catena del Marghine e dal Monte Arci. L'area, privata, è</p>	

attualmente adibita al pascolo ovino, e presenta un rado bosco di leccio e lentischio a delimitazione dei confini delle varie proprietà. A differenza dei terreni circostanti, non è stata oggetto di spietramenti con il mezzo meccanico; solo pochi massi, da testimonianza dei pastori della zona, sono stati rimossi per realizzare delle piste carrabili. La sua individuazione è avvenuta grazie all'analisi di questa porzione di territorio sulle foto satellitari messe a disposizione da Google. Nell'area circostante si riscontrano la presenza di frammenti di ossidiana, ceramica storica e un allineamento di pietre. L'area, occupata da 3 circoli megalitici e da altri massi ad essi riconducibili, si estende su una superficie di circa 1600 mq. Il materiale utilizzato per la costruzione dei circoli si trova sul posto, con una vera e propria zona di cava a breve distanza dal circolo C. I tre circoli megalitici sono costituiti da ortostati di altezza variabile (da un minimo di 0,52 metri ad un massimo di 1,70 metri), con diametro minimo di 10,50 metri e massimo di 15,81 metri.

Circolo A: è il più meridionale dei tre circoli presenti nel sito. È composto da 9 ortostati disposti in maniera discontinua, 7 dei quali ancora nella posizione originaria, con l'ortostato I leggermente spostato verso sud e l'ortostato V fuori posizione. Gli ortostati I, V e VII risultano inglobati in una recinzione realizzata con muratura a secco. L'altezza dei blocchi varia da 0,56 metri del VI a 1,70 metri del IX.

Circolo B: si trova nell'area centrale del sito. Oltre ad essere il più esteso, con i suoi 15,81 metri di diametro, risulta essere anche il più rimaneggiato, con integrazioni di muratura a secco in epoca recente per la realizzazione di un recinto per il ricovero del bestiame. Gli ortostati ancora in posizione lungo la circonferenza sono 11, disposti in maniera continua in alcuni tratti, con un'altezza che varia da 0,86 del III blocco metri a 1,02 metri del II blocco. Ad est del circolo B sono presenti una serie di massi che potrebbero essere riconducibili ad esso.

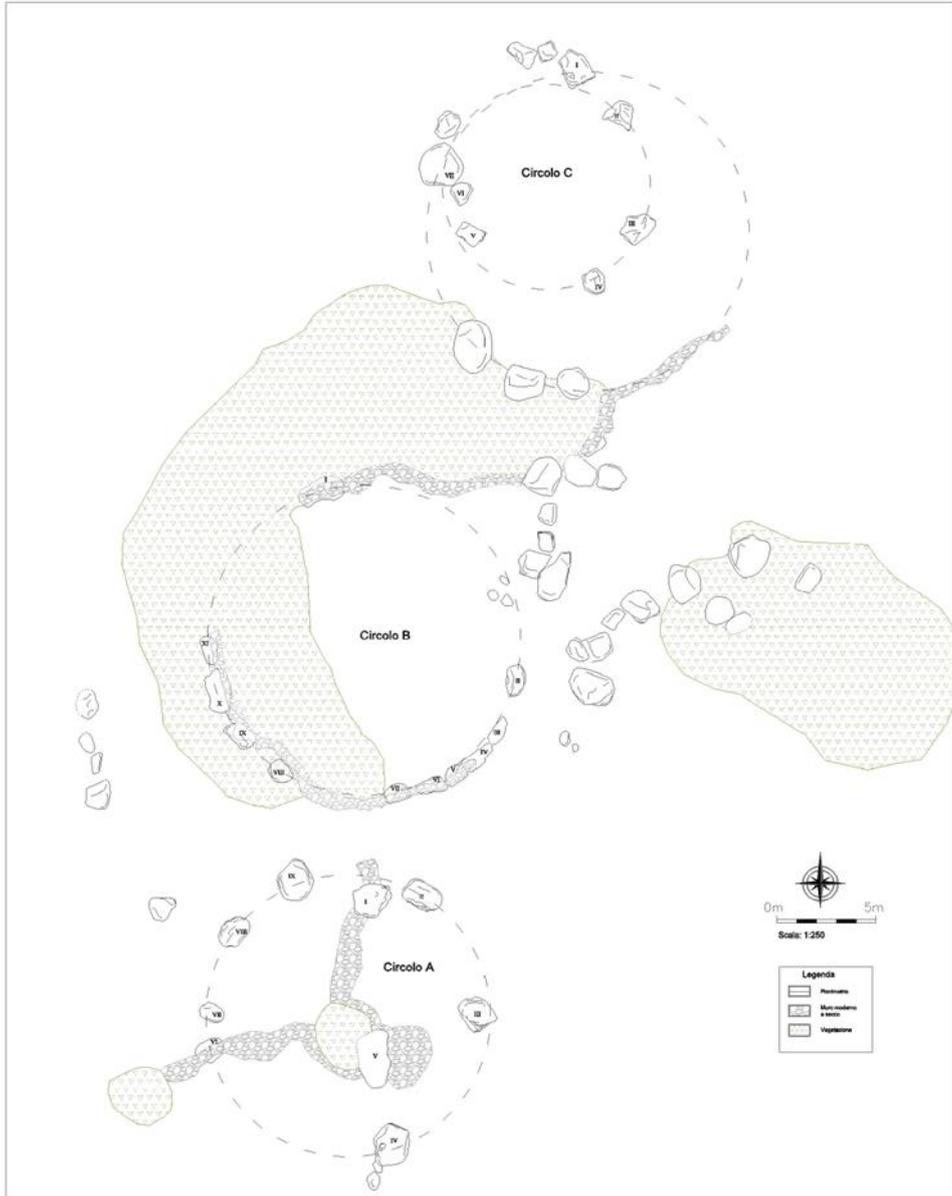
Circolo C: il più settentrionale e meno esteso dei tre circoli (10,50 metri di diametro). La disposizione dei blocchi attorno all'area potrebbe indicare la

presenza di un circolo più grande che lo ingloba, ma le attuali condizioni del sito, in particolare la presenza della vegetazione, non permettono di avere una visione chiara e complessiva dell'area. È composto da sette ortostati, con altezza minima di 0,52 metri (blocco V) e massima di 1,53 (blocco VII).

Altri monumenti vicini: il nuraghe Latzones è il monumento di epoca nuragica più vicino al sito di Ausadù (700 m); nel raggio dei 3 chilometri troviamo i nuraghi Soliano, Mura Olia, Canchedda, Birighissones, Irigheddai.



Vista dei blocchi



Planimetria



Vista dall'alto (Google Earth)

Sito	Circoli megalitici di Tacuara
Comune Località Denominazione Sito Classe monumentale WGS84 Gauss Boaga Quota s.l.m. Quadro CTR Fiume a metri Idrografia Sorgente a m Morfologia Geologia Uso del suolo Materiale Orientamento Stato di conservazione: Cronologia: Documentazione fotografica: Documentazione grafica: Elementi culturali:	Nurri (CA) Tacuara o Taccu Ara Tacuara Area sacra Circoli megalitici 39°41'19.20"N, 9°10'39.80"E 4393231.35 N, 1515269.28 E 544 540.110 350 Rio Bau di Perda Ollastu, Rio Mulargia, Rio Bau Nurri 280 Altopiano R81 - Unita' prevalentemente arenacee (Siluriano) Pascolo Circoli megalitici Tacuara Basalto Circoli A e B a sud-est; altri non rilevabile Mediocre III-II millennio a.C. Foto digitali a colori Pianta Coppelle, ossidiana, motivi scolpiti, ceramica storica
<p>Come raggiungere il sito:</p> <p>Dalla SS 198, in direzione Nurri, imboccare la Strada Comunale Seui-Nurri e percorrerla per 1.200 m, quindi svoltare a destra e imboccare la Comunale Mandas-Nurri per altri 2 chilometri, giungendo alla fine dello sterrato. Per raggiungere all'area dei circoli megalitici è necessario attraversare l'azienda agricola, salire sul margine meridionale dell'altopiano e camminare per circa 100 m in direzione Nord a partire dal nuraghe Ceas.</p> <p>Esplorazioni scientifiche e/o scavi:</p> <p>L'area è stata oggetto di censimento archeologico da parte del Consorzio Archeosystem ma i circoli megalitici non sono stati segnalati.</p>	

Descrizione:

Il sito di Tacuara è l'unico tra quelli elencati ad aver restituito un numero maggiore a tre circoli megalitici, nonché l'unico ad avere delle strutture che sono contigue. La sua individuazione è avvenuta grazie alle immagini del Geoportale Nazionale, le più nitide per questa porzione di territorio. L'area megalitica si estende nella parte meridionale dell'omonimo altopiano, uno stretto tavolato basaltico che si sviluppa per una lunghezza di circa 1.800 m in direzione Nord-Sud, con una superficie di 18 ettari. Sulla stessa altura è stata rilevata la presenza di numerose coppelle, dispersioni di ossidiana, ceramica storica e nuragica, oltre a quattro nuraghi, tre dei quali complessi e con annesso villaggio, diverse cave di basalto (utilizzato fino alla metà del secolo scorso per la realizzazione delle macine), due necropoli di epoca storica. Provengono da Tacuara due blocchi di basalto utilizzati in una costruzione degli anni '70 con motivi a spina di pesce. La piana, non adatta all'agricoltura (fattore che ha permesso la conservazione dei monumenti), è adibita al pascolo brado e domina le vallate circostanti con un'ottima visibilità sugli altopiani di Nurri (Pranemuru e Guzzini, che ha restituito i resti di un circolo megalitico in località Cea Santa) e di Serri (Santa Vittoria). Sono presenti almeno sette circoli megalitici, con diametri che variano dai 16 m ai 20 m e circonferenze dai 50 ai 65. Per la delimitazione dell'area circolare i costruttori sfruttarono anche la roccia naturale, che è quindi elemento costruttivo a tutti gli effetti. Gli ortostati sono disposti uno accanto all'altro con soluzione continua, in alcuni casi senza lasciare spazio per il passaggio, e spesso sono rovesciati.

Circolo A: Il più meridionale dei circoli megaliti, prossimo al nuraghe Ceas (circa 30 metri). Il diametro è di 23,31 metri, con una circonferenza di 73,24 metri e probabile ingresso monumentale a ESE (blocchi I-IV). È composto da un totale di 37 blocchi, di altezza variabile, talvolta rovesciati, che spesso spuntano dal terreno. Si trova in uno dei punti più stretti dell'altopiano ed ha un'ottima visibilità sulle vallate circostanti.

Circolo B: ha un diametro di 19,30 metri ed una circonferenza di 60,63 metri. Residuano 13 blocchi: Due grossi blocchi (I e II) sul lato orientale potrebbero far parte dell'ingresso originario, altri 11 blocchi sul lato occidentale rappresentano invece l'unico tratto ancora ben visibile per circa 12 metri.

Circolo C: il terzo circolo ha 22,30 metri di diametro e 70,03 di circonferenza. I 26 blocchi residui si trovano soprattutto nell'area meridionale. Impossibile individuare l'ingresso.

Circolo D: diametro 19,25 metri, circonferenza 60,50 metri. Anche in questo caso è molto difficile individuare l'ingresso nei 29 blocchi residui, spesso di piccole dimensioni. Risulta ben conservato sul lato occidentale, meno su quello orientale.

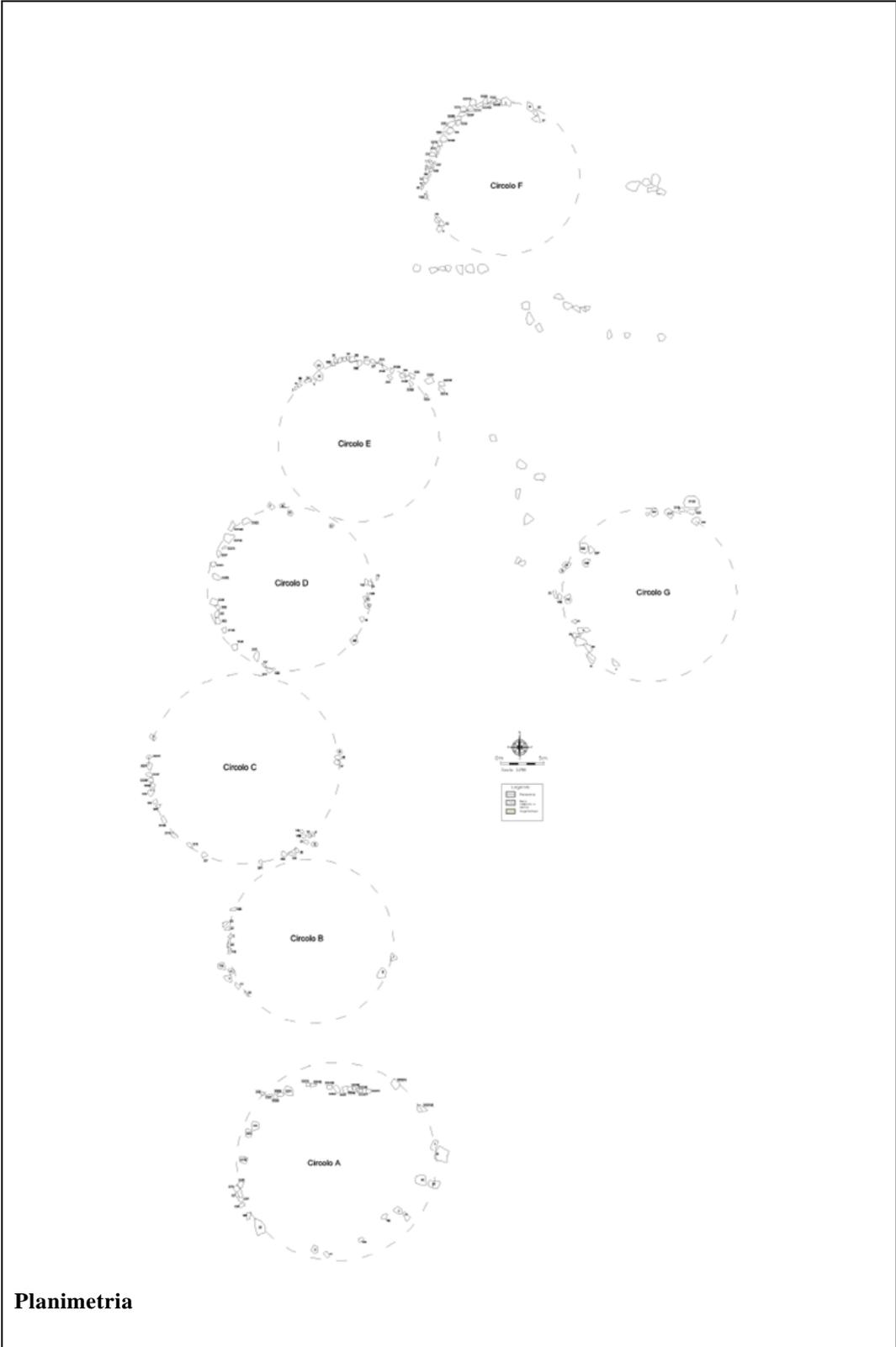
Circolo E: diametro 18,86 metri; circonferenza residua solo nell'area settentrionale per circa 19 metri. È costituito da 28 blocchi di varie dimensioni, molti dei quali coppedati e rovesciati.

Circolo F: Il più settentrionale dei circoli ha un diametro 18,02 metri ed una circonferenza 56,63 metri. Difficile individuare l'ingresso nei 31 blocchi residui, spesso di piccole dimensioni. Ben conservato sul lato occidentale, meno su quello orientale.

Circolo G: il più orientale dei circoli, si trova sul limite dell'altopiano ed ha un diametro di 20,40 metri, con una circonferenza visibile per circa metà del suo andamento originario. Sono visibili venti blocchi lungo la circonferenza, alcuni di grosse dimensioni (in particolare il XVIII, che misura 1,70 metri x 1,40 metri).

Altri monumenti vicini: Nuraghi: Ceas, Corrili/Curreli, Tacuara, Genna 'e Matta; necropoli storiche di Corrili.

Bibliografia: MARCIALIS-ORGIANA 2017

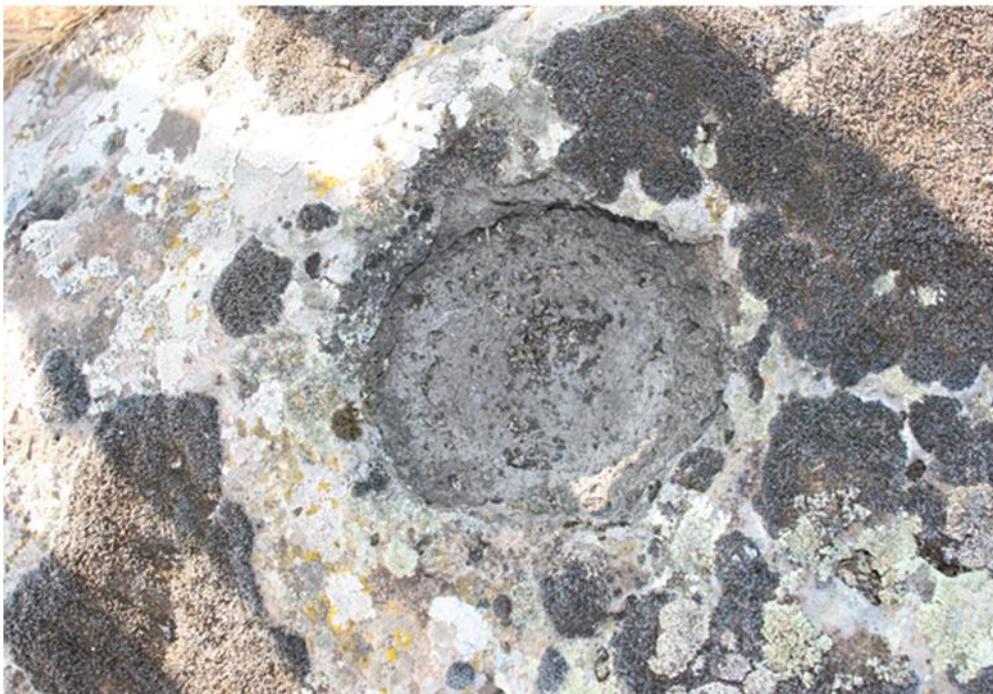




Vista dall'alto (Geoportale Nazionale)



Rilievo con DGPS e documentazione

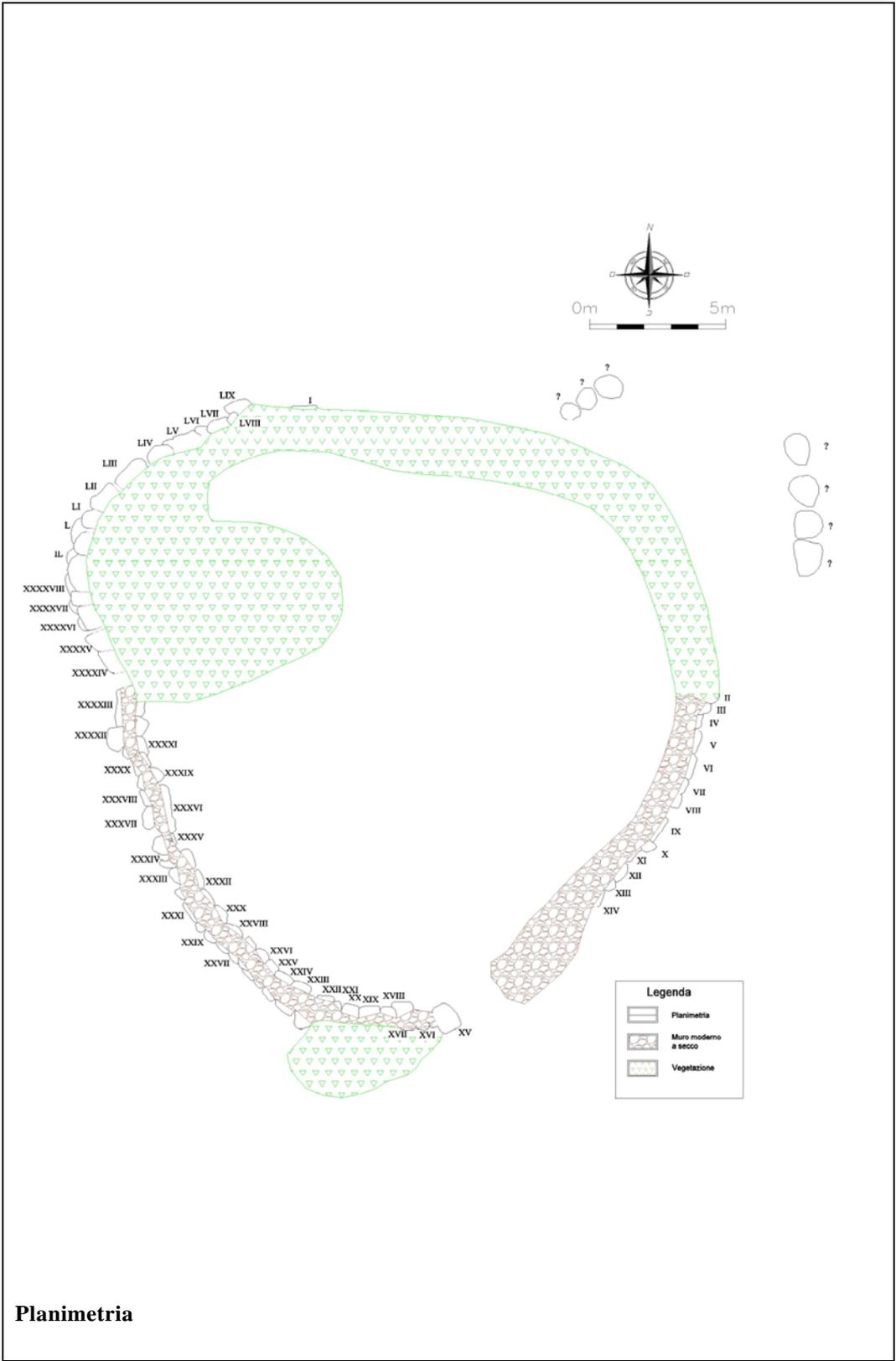


Coppelle

Sito	Circolo megalitico Su Corrazzu de Is Pillonis
Comune Località Denominazione Sito Classe monumentale WGS84 Gauss Boaga Quota s.l.m. Quadro CTR Fiume a metri Idrografia Sorgente a m Morfologia Geologia Uso del suolo Materiale Orientamento Stato di conservazione: Cronologia: Documentazione fotografica: Documentazione grafica: Elementi culturali:	Guspini (CI) Cuili Serpi – San Giovanni Su Corrazzu de is Pillonis Area sacra Circolo megalitico 39°37'36.42"N, 8°37'20.78"E 4386416.25 N, 1467626.53 E 37 538.160 290 Riu de su Sessini, Riu Launaxis, Riu San Giovanni, Riu Is Trigas Pianura R4 - Detriti, alluvioni terrazzate, fluviolacustri e fluvioglaciali (Pleistocene) Area con vegetazione rara Basalto Sud-est Mediocre III-II millennio a.C. Foto digitali a colori Pianta, 3D Ceramica nuragica
<p>Come raggiungere il sito:</p> <p>Dalla SS 126, in direzione San Nicolò d'Arcidano, imboccare la SP 64, percorrendola per 3.5 km. Poco prima di giungere alla SP 65 girare a sinistra e percorrere una strada sterrata; dopo 150 metri attraversare un canale e continuare per altri 450 metri. Il circolo megalitico sarà visibile sulla destra, nei pressi di un capanno abbandonato.</p> <p>Descrizione:</p> <p>Il circolo megalitico di Su Corrazzu de is Pillonis è localizzato nelle campagne del guspinese, in un'area prevalentemente pianeggiante, ai piedi del colle Su Brunk'e s'Orcu, sul quale si erge l'omonimo nuraghe. Il terreno immediatamente circostante al circolo è prevalentemente roccioso, ma a</p>	

poche centinaia di metri è praticata l'agricoltura intensiva. Il sito insiste su un'area di proprietà privata, in parte recintata. Il monumento ha subito modifiche in epoca moderna, con lo spostamento di alcuni blocchi e l'integrazione di muratura a secco per il ricovero del bestiame. Tali modifiche non permettono, pertanto, di affermare che l'ingresso attuale coincida con l'originale, né si può escludere che vi siano state modifiche nella disposizione planimetrica dei blocchi di basalto. Il monumento è in parte coperto dalla vegetazione, ma si conserva per quasi tutto il suo perimetro, di 68.50 metri, che racchiude un area di 369 mq. È stato individuato con la ricerca sulle mappe di Google, nonostante la sua forma non perfettamente circolare. Analizzando il circolo megalitico a partire dall'ingresso attuale, rivolto a Sud-Est, si contano almeno 41 ortostati per un andamento continuo di 36 metri. Procedendo sul lato opposto si contano altri 13 ortostati disposti su un arco di 9 metri. Il restante perimetro è nascosto dalla vegetazione. L'ortostato più alto misura 1,20 metri.

Altri monumenti vicini: Nuraghe Bruncu s'Orcu, nuraghe Melas, nuraghe Saurecci





Vista degli ortostati e dei rimaneggiamenti moderni



Vista dall'alto (Google Earth)

Sito	Circolo megalitico Su Forreddu
Comune Località Denominazione Sito Classe monumentale WGS84 Gauss Boaga Quota s.l.m. Quadro CTR Fiume a metri Idrografia Morfologia Geologia Uso del suolo Materiale Orientamento Stato di conservazione: Cronologia: Documentazione fotografica: Documentazione grafica: Elementi culturali:	Gesico (CA) Crocoriga Su Forreddu Area sacra Circolo megalitico 39°37'34.92"N, 9°03'51.51"E 4386303.89 N, 1505549.35 E 245 540.130 150 Rio Mannu, Riu Baccu Narba, Canale Sturru Collinare R24 - Marne talora con selce, di facies pelagica (Miocene medio-inferiore) Seminativo Marna Non rilevabile Distrutto III-II millennio a.C. Foto a colori Nessuna Coppelle
<p>Come raggiungere il sito:</p> <p>Partendo da Gesico si percorre la strada comunale Gesico-Villamar per circa 400 metri e si svolta a sinistra per la strada comunale Gesico-Villanovafranca; dopo circa 3 km, sulla sinistra, si nota il colle sul quale sorgeva il circolo megalitico.</p> <p>Esplorazioni scientifiche e/o scavi:</p> <p>L'area non è stata oggetto d'indagine.</p> <p>Descrizione:</p> <p>L'area archeologica di Su Forreddu è stata individuata grazie alle immagini satellitari di Google. Il circolo megalitico, come documentano le immagini storiche, è stato distrutto per lasciare spazio alle colture tra il 2 aprile 2005 ed il 2 ottobre 2006. Oltre alle immagini satellitari la documentazione è costituita</p>	

da una serie di foto scattate negli anni '90 dal signor Carlo Carta, appassionato di archeologia, conosciuto nel corso delle ricognizioni. I grossi massi lastriformi che formavano il circolo, alti oltre 2 metri, furono utilizzati per la costruzione di un canale nei pressi del centro servizi comunale e sono ad oggi ben visibili. Il monumento megalitico aveva un diametro di circa 46 metri, mentre risulta impossibile individuarne l'ingresso. Esso è ben visibile dall'area sacra presente sul colle di San Mauro. Dalle ortofoto dei voli effettuati nel 1954 e nel 1977 si nota probabile la presenza di altre 3 strutture circolari e di una sub-ellittica a ridosso dell'area.

Altri monumenti vicini: Nuraghi: Muttas Nieddas, Berritta Furriada, Nuratzolu, Accas; area sacra presso il colle di San Mauro; tomba Muttas Nieddas.



Elementi culturali nel vicino colle San Mauro



Veduta del circolo prima e dopo la sua distruzione

Resumen Capítulo 8: La investigación en las macroáreas

El capítulo examina un caso de estudio en el cual la investigación en porciones del territorio regional está dirigida a la búsqueda de círculos o recintos megalíticos. La identificación de los yacimientos arqueológicos fue facilitada por el reconocimiento aéreo y el análisis de fotografías satelitales a través de plataformas WebSIG. Esto llevó a la búsqueda de contextos similares en Cerdeña, tanto a través de informes en línea como mediante teledetección de áreas potencialmente adecuadas para la presencia de monumentos megalíticos. El caso de estudio tiene como objetivo continuar y actualizar esta investigación y establecer las bases metodológicas para identificar dichos sitios, centrándose en macroáreas en Cerdeña central, meridional y septentrional. Se prestó especial atención a las zonas de mesetas y colinas, entornos frecuentados por los constructores de megalitos. Las áreas investigadas incluyen el Sarcidano, la Trexenta, la meseta de Abbasanta, la Barbagia de Ollolai, el Sassarese y el Anglona. El análisis del paisaje y la toponimia guiaron la selección de áreas con características geomorfológicas favorables para la presencia de círculos y recintos megalíticos. El enfoque metodológico requirió el uso de diversas plataformas WebSIG, la comparación con material cartográfico tradicional y el uso de *remote sensing* (teledetección). El territorio se dividió en cuadrantes y se analizó por "franjas" de imágenes. La toponimia contribuyó a la identificación de nombres de lugares relacionados con la presencia de monumentos megalíticos. La verificación en el campo fue esencial para confirmar la presencia efectiva de los yacimientos identificados mediante *remote sensing*. La recopilación de datos durante el reconocimiento incluyó información sobre el estado de conservación de los círculos megalíticos, su posible reutilización en la época moderna y la presencia de otros círculos o manipulaciones. El levantamiento fotográfico se llevó a cabo utilizando diferentes ópticas, mientras que el escaneo láser 3D contribuyó a obtener datos detallados sobre los sitios identificados. En resumen, el caso de estudio ilustra un enfoque multidisciplinario para la investigación y la identificación de sitios megalíticos en Cerdeña, combinando métodos tradicionales con tecnologías modernas para una comprensión más profunda del patrimonio megalítico de la región.

9. Analisi dei dati, confronti, risultati.

Questo capitolo mira a fornire un approfondimento critico sui diversi approcci utilizzati per ottenere i rilievi tridimensionali sopra descritti, mettendo in luce i loro vantaggi, limiti e applicazioni specifiche. Saranno esaminati i metodi utilizzati raffrontandoli ad alcuni di quelli simili noti in bibliografia, affrontando tematiche quali la precisione, la velocità di acquisizione, la robustezza nei confronti delle condizioni ambientali e la versatilità d'uso. L'obiettivo principale è fornire una visione esaustiva e aggiornata allo stato attuale delle opzioni disponibili, al fine di guidare la scelta della tecnica più adatta alle specifiche esigenze di ricerca o applicative. Attraverso una panoramica sistematica delle tecniche di rilievo tridimensionale, si auspica di contribuire all'arricchimento del dibattito scientifico e alla promozione di una consapevole selezione delle metodologie in funzione degli scopi prefissati. In tal modo, questo capitolo costituirà un utile strumento di riferimento per coloro che si cimentano nel campo della documentazione tridimensionale, offrendo un quadro chiaro e dettagliato delle opzioni disponibili e delle finalità connesse.

9.1. Il rilievo dei vasi miniaturistici rinvenuti in una sepoltura eneolitica in località Corti Beccia (Sanluri).

Il caso di studio di Corti Beccia

Nel sesto capitolo della tesi, si esplorano due casi di studio relativi al rilievo di reperti mobili, concentrandosi su un approccio tecnico mirato all'analisi e alla divulgazione scientifica dei risultati. In particolare, il primo caso di studio si focalizza sul disegno tecnico di una serie di vasi miniaturistici rinvenuti in una sepoltura eneolitica a Sanluri, in località Corti Beccia, utilizzando due modalità differenti: la fotogrammetria digitale e lo ZScan Micro. L'obiettivo principale di questo studio è quello di ottenere una rappresentazione dettagliata dei reperti attraverso l'elaborazione di modelli tridimensionali, in forma di *mesh*, derivanti da nuvole di punti dense. Questi modelli saranno successivamente condivisibili su diverse piattaforme e in vari formati, facilitando l'estrazione di prospetti e sezioni degli oggetti per ulteriori analisi. La procedura di estrazione dei dati bidimensionali dai modelli ottenuti mediante fotogrammetria digitale e ZScan Micro richiede l'utilizzo degli stessi software e segue tempistiche analoghe. L'uso del software *open source* CloudCompare permette di allineare i due modelli e di verificare eventuali differenze nell'elaborazione. L'allineamento consente di garantire un elevato livello di precisione nei modelli, contribuendo così alla coerenza e all'affidabilità dei dati raccolti. Il successivo passo dell'elaborazione coinvolge il software AutoCAD, dove le sezioni ottenute in formato vettoriale .dxf/.dwg vengono importate, impaginate e stampate in formato .pdf o .jpg. Questo processo offre un confronto dettagliato che mette in luce i punti di forza e di debolezza delle due tecniche impiegate. La valutazione comparativa evidenzia che il rilievo per triplette dello ZScan Micro, sebbene possa garantire una notevole precisione, richiede generalmente più tempo rispetto al rilievo *Structure from Motion* (SfM). La barra elettronica dello ZScan Micro, necessitando di stabilizzazione su un treppiede o piano, limita la libertà di movimento e richiede calibrazioni frequenti durante il cambio di distanza

dall'oggetto da rilevare. Inoltre, la necessità di supporti vari per posizionare correttamente l'oggetto aggiunge una complessità logistica al processo di acquisizione. D'altro canto, il sistema SfM consente una rapida acquisizione di immagini, con la possibilità di selezionare successivamente quelle utili per l'elaborazione. L'utilizzo di uno sfondo neutro in questo contesto minimizza il tempo dedicato alla delimitazione delle aree da non considerare (“maschere”) prima dell'allineamento delle immagini. Il sistema ZScan Micro, inoltre, presenta tempi di elaborazione del modello più lunghi a causa della necessità di utilizzare tre software diversi: ZScan Micro per l'acquisizione, ZScan per l'elaborazione delle triplette di immagini e CloudCompare per l'allineamento e il calcolo del modello finale. In contrasto, il sistema SfM impiega un singolo software, Agisoft Metashape, che, una volta impostate le preferenze desiderate, esegue tutte le fasi, dall'allineamento delle immagini al calcolo della mesh in maniera autonoma. Per quanto riguarda il sistema ZScan Micro, i punti di forza evidenziati sono la precisione e la possibilità di lavorare senza l'ausilio di riferimenti metrici esterni. I risultati ottenibili con questo strumento sono paragonabili a quelli di un 3D scanner a luce strutturata. Tuttavia, i limiti iniziano con la complessità e l'ingombro dell'attrezzatura, inclusa la necessità di trasportare fotocamera, ottiche, treppiede o tavolo, lampade LED e il sistema di cavi di collegamento, oltre al PC per il controllo della barra elettronica. Al contrario, il sistema SfM, sebbene richieda riferimenti metrici esterni, può essere implementato con una configurazione più snella, utilizzando fotocamera, ottiche, corpi illuminanti e, opzionalmente, un piatto rotante e un treppiede fotografico. Per il rilievo di piccoli oggetti, un metrino o un calibro possono essere sufficienti per fornire riferimenti metrici. Inoltre, l'analisi dei costi evidenzia che l'attrezzatura per il sistema ZScan Micro ha un costo quadruplo rispetto a una licenza di Agisoft Metashape Professional. È importante sottolineare che esistono anche software SfM completamente gratuiti, che riducono ulteriormente il costo complessivo. In conclusione, la scelta tra ZScan Micro e SfM per il rilievo e la restituzione grafica della ceramica dipende dalle specifiche esigenze del progetto. Mentre ZScan Micro offre precisione e indipendenza dai riferimenti metrici esterni, il sistema SfM si presenta come una

soluzione più veloce, efficiente e meno onerosa in termini di attrezzatura. La selezione del metodo migliore deve tener conto di fattori quali la dimensione degli oggetti da rilevare, la necessità di micro-rilievi per scopi specifici e le risorse finanziarie a disposizione.

In sintesi, alla luce del caso di studio analizzato, sono stati ottenuti i seguenti risultati:

1. Metodologia di rilievo:

Si identificano due approcci tecnici: la fotogrammetria digitale e lo ZScan Micro. L'obiettivo principale è ottenere una rappresentazione dettagliata dei reperti attraverso l'elaborazione di modelli tridimensionali in forma di *mesh*, derivanti da nuvole di punti dense. L'obiettivo è stato raggiunto con entrambe le tecniche.

2. Strumenti e software utilizzati:

Si utilizza il software *open source* CloudCompare per allineare i modelli ottenuti mediante fotogrammetria digitale (Agisoft Metashape) e ZScan Micro, per poi unire i dati ottenuti. Il software AutoCAD è utilizzato per l'importazione, impaginazione e stampa delle sezioni in formato vettoriale .dxf/.dwg. Per l'ottenimento del risultato finale tutti i software utilizzati si sono rivelati di fondamentale importanza.

3. Confronto tra ZScan Micro e *Structure from Motion* (SfM):

Lo ZScan Micro si è rivelato uno strumento molto preciso, ma richiede più tempo rispetto alla fotogrammetria. Sono state evidenziate numerose limitazioni, come la necessità di maggiore stabilità, ottenuta con il posizionamento su treppiede, calibrizioni frequenti e la complessità logistica aggiunta dai supporti vari. La fotogrammetria SfM offre una rapida acquisizione di immagini, con un processo più snello e meno oneroso in termini di attrezzatura.

4. Tempistiche e complessità operativa:

Si sottolinea che lo ZScan Micro impiega più tempo a causa delle diverse fasi di acquisizione ed elaborazione coinvolte, mentre la fotogrammetria SfM utilizza un singolo software. L'attrezzatura necessaria al rilievo ZScan Micro è più complessa e scomoda da trasportare, poiché fotocamera, ottiche, treppiede, lampade LED e cavi di collegamento. Tale complessità operativa è ancora più evidente nel caso di un possibile utilizzo all'aperto o in un cantiere.

5. Precisione e riferimenti metrici:

Lo ZScan Micro è uno strumento molto preciso e indipendente dai riferimenti metrici esterni. Le barre graduate, per quanto rallentino il processo di acquisizione, si sono rivelate degli apparati ben progettati e realizzati. La fotogrammetria SfM richiede riferimenti metrici esterni ma può essere implementata con una configurazione più snella.

6. Analisi dei costi:

L'attrezzatura per lo ZScan Micro ha un costo quadruplo rispetto a una licenza completa di Agisoft Metashape Professional. La presenza di software SfM gratuiti può ridurre ulteriormente i costi. Il sistema hardware dello ZScan implica, inoltre, una bassa versatilità: gli apparati più costosi, come ad esempio le barre graduate, non possono essere utilizzati con altri sistemi di rilievo.

7. Conclusioni:

La scelta tra ZScan Micro e SfM dipende dalle specifiche esigenze del progetto, considerando dimensioni degli oggetti, necessità di micro-rilievi e risorse finanziarie. ZScan Micro è più preciso, ma richiede più tempo e attrezzatura costosa, mentre la fotogrammetria SfM è più veloce ed efficiente, con costi inferiori. Di seguito una tabella riepilogativa dei risultati ottenuti. La "X" indica lo strumento più performante.

	ZScan Micro	SfM
Velocità di acquisizione		X
Libertà di movimento		X
Tempi di calibrazione		X
Necessità di riferimenti metrici	X	
Precisione	X	
Tempi di elaborazione		X
Versatilità del sistema		X
Costo di attrezzatura e software		X

Tabella 7. Confronto tra sistema ZScan Micro e *Structure from Motion* (SfM) nel rilievo dei manufatti in ceramica.

9.1.1. Casi di studio a confronto.

La ricerca dei confronti

L'analisi della bibliografia dedicata al rilievo tridimensionale dei reperti archeologici mette in evidenza una notevole disparità rispetto alla vastità di pubblicazioni che riguardano i beni immobili e la documentazione degli scavi archeologici. Questo divario nella letteratura evidenzia una relativa scarsità di studi approfonditi e di approcci metodologici focalizzati al rilievo tridimensionale dei reperti ceramici. La predominanza di ricerche incentrate sui beni immobili e sulla documentazione degli scavi potrebbe riflettere una storica attenzione prioritaria rivolta agli elementi architettonici e strutturali, considerati tradizionalmente come elemento di maggiore urgenza nelle indagini archeologiche. Tuttavia, i reperti mobili, che spesso comprendono oggetti di vario genere come vasi, utensili, e manufatti artistici, rivestono un ruolo cruciale nella comprensione delle culture passate, fornendo preziose informazioni sulla vita quotidiana, le pratiche rituali, e l'artigianato. La carenza di studi specifici dedicati al rilievo tridimensionale dei reperti archeologici potrebbe essere attribuita a diversi fattori. Innanzitutto, la complessità e la variabilità dei reperti stessi richiedono metodologie di rilevamento che spesso differiscono notevolmente da quelle impiegate per le strutture architettoniche. Inoltre, la mobilità e la fragilità di molti reperti impongono processi molto articolati nel processo di acquisizione dei dati tridimensionali. L'avanzamento tecnologico nell'ambito del rilievo tridimensionale, come l'introduzione di 3D laser scanner, fotogrammetria digitale e altre tecniche innovative, ha indubbiamente ampliato le possibilità di studiare i reperti mobili in modo più dettagliato e accurato. Tuttavia, la mancanza di una bibliografia esaustiva in questo settore suggerisce che l'implementazione di queste tecnologie potrebbe non essere stata pienamente sfruttata o documentata nella letteratura accademica. Un altro aspetto da considerare è l'importanza della collaborazione interdisciplinare tra archeologi, ingegneri, esperti di restauro e specialisti in tecnologie di rilevamento. La mancanza di una convergenza tra queste discipline potrebbe

limitare lo sviluppo di metodologie avanzate e la pubblicazione di risultati e studi significativi e confronti nel settore. Affrontare questa lacuna nella letteratura richiede una maggiore consapevolezza dell'importanza del rilievo dettagliato dei reperti mobili nell'ambito della ricerca archeologica e una spinta verso una più ampia diffusione delle tecniche avanzate di rilevamento tridimensionale. Questo potrebbe essere facilitato attraverso la promozione di progetti di ricerca specifici, conferenze e pubblicazioni incentrate sulle metodologie e gli strumenti utilizzati per acquisire, analizzare e interpretare in modo razionale i dati derivanti dalla digitalizzazione dei reperti. È rilevante evidenziare la significativa carenza di studi dedicati alla documentazione tridimensionale delle ceramiche preistoriche non tornite. Questo vuoto nell'ambito della ricerca si manifesta sia nell'approccio strumentale che in quello manuale, e tale mancanza è particolarmente accentuata considerando la varietà di tecniche di esecuzione utilizzate in questo contesto specifico. Il rilievo strumentale delle ceramiche preistoriche presenta problematiche differenti rispetto a quelle tornite, sia dal punto di vista tecnico che interpretativo, soprattutto perché non è possibile sfruttare gli algoritmi di calcolo che permettono la ricostruzione delle forme. In conclusione, la carenza di una vasta bibliografia sui casi di studio relativi al rilievo tridimensionale dei reperti mobili indica un'area di ricerca ancora in fase di sviluppo e sottolinea la necessità di un impegno continuo per colmare questa lacuna. Una maggiore attenzione a questa dimensione del patrimonio archeologico può arricchire notevolmente la comprensione delle società del passato e contribuire a preservare in modo più completo e accurato il nostro patrimonio culturale.

Rilievo di una serie di manufatti in ceramica tornita

Uno dei casi di studio simili che vale la pena di approfondire è quello sperimentato oltre vent'anni fa, ma ancora attuale e valido, da Peripimeno e Salvadori nel rilievo di una serie di manufatti provenienti da Poggio Imperiale, dal Castello di Miranduolo a Chiusdino e dal Convento del Carmine di Castel di Pietra (PERIPIMENO-SALVADORI 2003). La rilevanza di questo caso di studio risiede non solo dal periodo in cui è stato condotto (si tratta, infatti, di uno dei

primi lavori a carattere scientifico di questo genere), ma soprattutto nelle metodologie e nelle tecnologie utilizzate. Vent'anni fa, il campo del rilievo tridimensionale poteva già vantare diverse tecniche, ma molte delle tecnologie avanzate e degli strumenti che oggi sono comunemente impiegati non erano altrettanto diffusi o sviluppati. Inoltre, è interessante esaminare come i risultati ottenuti da Peripimeno e Salvadori in questo caso di studio abbiano influenzato successivi sviluppi nella metodologia del rilievo archeologico. Le scelte metodologiche adottate, i limiti incontrati e le soluzioni proposte possono aver fornito le basi per ulteriori ricerche e perfezionamenti tecnologici nel settore.

Nel costante impegno di esplorare e implementare nuovi approcci e strumenti di documentazione nel contesto dell'informatica applicata all'archeologia, il Laboratorio di Informatica Applicata all'Archeologia Medievale (LIAAM), facente parte del Dipartimento di Archeologia e Storia delle Arti dell'Università di Siena, aveva recentemente integrato nel suo arsenale tecnologico uno scanner tridimensionale di ultima generazione. La scelta era ricaduta sul modello VI-900 prodotto da Minolta, selezionato per le sue specifiche tecniche ritenute particolarmente idonee per l'acquisizione digitale dei reperti archeologici provenienti dagli scavi. Si tratta di una periferica all'avanguardia progettata per catturare informazioni geometriche e colorimetriche di una superficie e trasferirle al computer, del tipo a triangolazione ottica (SALVADORI 2003), con un principio di funzionamento simile a quello del sopra descritto Scansystem. Lo strumento utilizza un fascio laser, uno specchio galvanico, una lente ottica e un sofisticato sistema CCD di conversione. In modo più specifico, durante ogni singola scansione, lo scanner genera una nuvola di punti che rappresenta in maniera dettagliata la struttura tridimensionale della superficie, e contemporaneamente acquisisce un'immagine di 640x480 pixel. Questa combinazione di tecnologie consente di ottenere una rappresentazione precisa e dettagliata degli oggetti scansionati, contribuendo così alla documentazione accurata e completa di forme e dettagli. Nonostante questo strumento risulti essere un po' datato le sue caratteristiche lo rendono ancora utilizzabile. Per quanto riguarda modalità e tempi di acquisizione vi sono grandi differenze da segnalare tra questo strumento, lo ZScan Micro e la tecnica SfM. In questo caso

il Minolta e tutti gli strumento a triangolazione ottica permettono, a fronte di un investimento iniziale più elevato, di ottenere scansioni di ottima qualità e più rapidamente. Le periferiche 3D Minolta avevano già dimostrato la loro versatilità ed efficacia in svariati ambiti disciplinari, abbracciando l'archeologia, l'architettura, la computer grafica, il disegno industriale e persino la medicina. In questo contesto, la sperimentazione della periferica Minolta è stata focalizzata, come anticipato, sull'elaborazione di modelli tridimensionali dei reperti archeologici. L'intensivo utilizzo nel corso del primo anno di attività aveva condotto al delinarsi di due fondamentali percorsi di documentazione: la produzione di nuovi supporti per la visualizzazione dei reperti e lo sviluppo di nuovi metodi di rilievo archeologico. Nella prima fase, si è concentrata l'attenzione sulla creazione di supporti innovativi che consentono la visualizzazione dei reperti tramite il calcolatore, sia a livello locale che attraverso i *browser web*; questo approccio ha aperto nuove prospettive per la fruizione digitale dei reperti archeologici, consentendo una visione dettagliata e interattiva che va ben oltre la semplice consultazione di documenti cartacei. Nella seconda fase, quella che ci interessa maggiormente per il confronto, l'intenso impiego dello scanner tridimensionale Minolta ha stimolato lo sviluppo di metodologie avanzate per il rilievo archeologico dei reperti. Questo secondo percorso aveva l'obiettivo di perfezionare le tecniche di acquisizione, consentendo una maggior precisione nella ricostruzione digitale e aprendo la strada a nuove analisi e interpretazioni degli oggetti scavati. L'implementazione di questi percorsi di documentazione ha rappresentato un passo significativo verso l'innovazione nell'ambito del disegno dei reperti, offrendo nuovi strumenti e approcci che arricchiscono la comprensione e la divulgazione del patrimonio storico e culturale.

Il processo di trasformazione della nuvola di punti in una superficie tridimensionale e l'applicazione dell'immagine corrispondente erano gestiti attraverso il software Polygon Editing Tool, abbreviato PET, sviluppato internamente da Minolta e all'epoca alla versione 1.13. L'infrastruttura hardware del sistema di acquisizione era articolata attorno allo scanner VI-900, connesso al PC tramite interfaccia SCSI. Il PC era dotato di una scheda di accelerazione

grafica per garantire un'elaborazione veloce ed efficiente dei dati acquisiti. Un componente chiave è la tavola rotante, collegata al computer attraverso la porta seriale, la quale ha consentito la rotazione controllata degli oggetti durante la fase di scansione. In aggiunta, sono state integrate nel sistema due tavole di calibrazione, fungendo da elementi chiave per il software PET. Queste tavole sono state utilizzate dal software per "ricomporre" l'oggetto digitalmente, posizionando le superfici scansionate in relazione all'angolo di rotazione della tavola rotante. In questo modo, si ottiene una ricostruzione accurata e coerente dell'oggetto acquisito, contribuendo alla precisione e all'affidabilità del processo di digitalizzazione tridimensionale. Il software PET ha dato la possibilità di connettere agevolmente le periferiche a qualsiasi computer mediante un'interfaccia intuitiva. All'interno di questa interfaccia, è stato possibile configurare vari parametri fondamentali per il processo di acquisizione tridimensionale. Tra questi, è stato definito l'angolo di rotazione della tavola e i dettagli relativi all'operatività dello scanner. Nel caso dello ZScan Micro e della fotogrammetria SfM è stata utilizzata una tavola rotante manuale, che ha consentito di far ruotare l'oggetto ma lasciando libertà all'operatore di decidere l'angolazione; questa soluzione risulterebbe poco utile nel caso della fotogrammetria, poiché con l'utilizzo di *markers* posizionati sulla tavola il software di elaborazione non trarrebbe ulteriori vantaggi da un calcolo dell'angolazione; al contrario, con lo ZScan questa tecnica permetterebbe di ottenere un grande vantaggio in termini di tempi di registrazione, ma allo stesso tempo renderebbe necessario l'utilizzo di un software differente per l'allineamento delle singole scansioni. Un altro dei punti di forza è stato il controllo da parte degli utenti sulla messa a fuoco dell'oggetto, con la flessibilità di scegliere tra un'opzione manuale o automatica. Anche nell'utilizzo di ZScan e SfM la regolazione della messa a fuoco è avvenuta manualmente, dimostrando che da questo punto di vista non vi sono stati grandi progressi; tale limite della fotogrammetria è riscontrabile anche nell'utilizzo dei droni, in cui la messa a fuoco degli oggetti nei voli programmati incontra ancora enormi difficoltà; l'utilizzo delle intelligenze artificiali nei software di acquisizione potrebbe risultare fondamentale in un prossimo futuro. Allo stesso modo, è stato possibile

regolare la potenza del fascio laser emesso dallo scanner, consentendo una personalizzazione accurata in base alle esigenze specifiche dell'oggetto in esame. Inoltre, è stato possibile definire i parametri relativi alla qualità dei colori, offrendo un controllo completo sull'aspetto visivo del risultato acquisito. Questa flessibilità operativa ha conferito un ampio grado di adattabilità nel processo di acquisizione, garantendo un elevato livello di precisione e personalizzazione. I reperti sottoposti a scansione sono stati in generale acquisiti configurando gli step di rotazione della tavola a 40 gradi. Solo in alcune situazioni, ad esempio per oggetti particolarmente scuri o traslucidi, è stata regolata manualmente la potenza del fascio laser emesso dallo scanner, mentre l'intervento per la messa a fuoco manuale è risultato raramente necessario. Nel rilievo ZScan e SfM non è presente il problema del fascio laser, ma se ne riscontra uno simile, dovuto sia alla luce ambientale che al livello di riflettività della superficie da rilevare; la regolazione della focale e della quantità di luce che entrano nelle fotocamera sono soggette a continue regolazioni.

Il secondo passo del processo di *reverse engineering* consiste nell'importazione della nuvola di punti, letta dalla periferica, all'interno dell'ambiente di lavoro del software PET. Durante questa fase, è stata eseguita una scrematura iniziale (in modo automatico) della nuvola di punti, riducendone la concentrazione del 25%. Gli oggetti risultanti dalla "fusione" delle superfici di ogni singola scansione, effettuata all'interno dell'ambiente di lavoro PET, presentavano una risoluzione variabile tra quarantaduemila e ottantaduemila punti, in base alle dimensioni e alla complessità strutturale del reperto acquisito. Il software è dotato di strumenti avanzati che consentono di eliminare i punti ridondanti, regolare la risoluzione di una superficie e, infine, modellare un oggetto in modo più o meno "liscio" (*smooth*). Ciascun reperto ceramico è stato documentato attraverso due file distinti: uno ad alta risoluzione di punti e uno a bassa risoluzione. Nel ventennio trascorso possiamo affermare che i software di elaborazione e le schede grafiche hanno subito importanti migliorie; pertanto, il software CloudCompare e il software Agisoft Metashape sono risultati molto performanti nel trattamento delle nuvole di punti, sia nell'allineamento che nei successivi processi di filtraggio, semplificazione e calcolo delle superfici.

Il processo di fusione delle scansioni in un unico oggetto comprendeva anche la generazione di un'immagine *raster*, che rappresentava in pratica un "raddrizzamento" dell'intera superficie del reperto. Tale immagine è stata successivamente applicata dal software sull'oggetto tridimensionale e visualizzabile all'interno dell'ambiente di lavoro. In alcuni casi, la periferica, configurata per ottenere un dettaglio massimo nella nuvola di punti pari a 0,17 mm per l'asse x, 0,17 mm per l'asse y e 0,047 mm per l'asse z, ha dimostrato una straordinaria precisione di acquisizione, rivelando dettagli fino allo spessore delle pennellate decorative sulle pareti delle maioliche arcaiche. I software utilizzati nell'analogo processo con ZScan e fotogrammetria SfM hanno permesso, allo stesso modo, di ottenere dei fotoraddrizzamenti di ottima qualità ma con una velocità di calcolo superiore; questo dimostra come in realtà attualmente si debba puntare più su un miglioramento degli strumenti di calcolo che degli strumenti di rilievo, poiché anche quelli datati come il Minolta permettono ancora oggi di ottenere dei buoni risultati. L'analisi del modello ottenuto con VI-900 e con software PET durante le fasi sperimentali ha messo in luce alcune limitazioni sia nel processo di acquisizione che nella successiva visualizzazione del modello virtuale su schermo. Per le forme ceramiche chiuse e completamente conservate, si è riscontrata l'impossibilità di effettuare una scansione integrale dell'area interna a causa delle limitazioni intrinseche dello scanner nel coprire l'intera estensione con il raggio laser. Per le forme aperte, invece, la visualizzazione ha spesso presentato errori significativi. L'immagine associata alla superficie interna del reperto ceramico mostrava, infatti, diverse imperfezioni dopo l'operazione di fusione delle singole scansioni. Questa problematica si accentuava ulteriormente quando si esportava l'oggetto nel formato universale WRML; in queste circostanze, la porzione interna appariva priva dell'immagine corrispondente. Il problema relativo al rilievo delle forme chiuse persiste ancora oggi, sia nel rilievo strumentale che in quello manuale; per quanto riguarda quello delle forme aperte, nel caso di studio sperimentato a Corti Beccia, non sono stati riscontrati particolari errori.

Il processo di conversione dei documenti ha richiesto una serie di passaggi di modellazione 3D e fotoritocco delle mappature. Nella modellazione di oggetti

destinati allo studio dei profili, l'obiettivo fondamentale era la ricerca della massima precisione, ottenuta grazie all'utilizzo combinato dello scanner 3D con un programma CAD. Per questo motivo, si è lavorato esclusivamente sulla mesh poligonale originaria, evitando, pur con un aumento sensibile del tempo di lavoro, la creazione di una nuova superficie *nurbs*. Inoltre, al fine di preservare il modello originale, non è stata operata alcuna scrematura dei punti e non sono stati chiusi eventuali buchi (*holes*) risultanti dalle operazioni di reverse engineering. Anche in questo caso il processo di elaborazione non ha subito importanti variazioni; si può pertanto affermare che l'ottenimento di un buon risultato è dovuto soprattutto all'attenzione con cui l'operatore effettua le operazioni di calcolo delle sezioni; si tratta, infatti, del momento in cui il disegnatore opera quelle scelte che non si possono demandare ai processi automatizzati del software, dimostrando che risulta ancora di fondamentale importanza una approfondita conoscenza delle tecniche di rilievo e restituzione tradizionali. Per quanto riguarda la modellazione delle ceramiche, una volta posizionato correttamente l'oggetto nell'area di lavoro, si è proceduto al calcolo del diametro basandosi sulla regola geometrica secondo la quale per tre o più punti non allineati passa una sola circonferenza. Mentre nel tradizionale disegno si determinava il centro attraverso l'intersezione di due rette costruite sui punti di intersezione di tre circonferenze costruite sul bordo esterno del frammento (LEONARDI-PENELLO 1991), nel CAD questa operazione è automatizzata. È stato sufficiente fissare tre punti sul bordo esterno e, tramite il comando che permette di disegnare un cerchio da tre punti noti tracciare la circonferenza corrispondente, il cui centro coincideva con quello del frammento. Questa procedura non è risultata affidabile nel caso di Corti Beccia, in quanto le ceramiche non tornite non hanno sempre una circonferenza perfetta. La presenza di forme quasi completamente chiuse ha spesso evitato questo calcolo, evidenziando d'altro canto un'altra problematica non ancora risolvibile, quella del calcolo dello spessore, che deve ancora avvenire in gran parte dei casi con strumenti tradizionali come il calibro. Per ottenere risultati più affidabili, il centro definitivo è stato determinato come punto medio tra due o più circonferenze tracciate sul frammento. Una volta ottenuto il centro con lo

strumento di elaborazione delle sezioni è stata ottenuta la linea di sezione. Questo strumento è stato in grado di effettuare sezioni liberamente orientabili. Sono state così elaborate una serie di sezioni ad intervallo variabile, ruotando la linea di orientamento sull'asse y, con l'attenzione di selezionare le parti più integre del frammento per non compromettere il confronto finale dei profili. I profili così generati sono stati proiettati sull'asse x mediante rotazioni e spostamenti vincolati al centro. Tuttavia, è importante sottolineare che questa sperimentazione ha evidenziato alcune limitazioni, soprattutto nel caso di forme chiuse o intere, a causa dell'impossibilità dello scanner, come già menzionato in precedenza, di coprire l'intera estensione con il raggio laser; questo problema è tipico anche del rilievo manuale delle ceramiche. Utilizzando lo scanner 3D laser come strumento principale, non è fattibile ottenere una scansione delle superfici interne di forme chiuse. In tali situazioni, questo tipo di approccio può comunque essere applicato con successo alla superficie esterna.

Ricostruzione ipotetica delle forme ceramiche e restituzione tridimensionale

Il costante avanzamento della ricerca nel campo del rilievo dei manufatti in ceramica rappresenta un fondamentale punto di riferimento per comprendere l'evoluzione delle tecniche di documentazione e ricostruzione. Per cogliere appieno questa progressione, è opportuno confrontare gli approcci attuali con casi di studio più recenti, ponendo particolare attenzione a una restituzione che va oltre la tradizionale rappresentazione bidimensionale. In questo contesto, si esamina il rilievo di una serie di reperti che mira non solo a una ricostruzione ipotetica delle forme, come nel caso di studio precedentemente analizzato, ma ad una rappresentazione tridimensionale. Il caso confrontato dimostra come oggi si possano utilizzare i dati acquisiti con tecniche di rilievo tridimensionale nell'impiego del cosiddetto "restauro virtuale" del manufatto. Attraverso gli strumenti di modellazione digitale, è possibile formulare una o più ipotesi ricostruttive del manufatto basandosi sulle informazioni recuperate dal frammento. Questo processo permette anche di visualizzare dati correlati a categorie e classi di riferimento. Nell'organizzazione di tutte queste

informazioni, lo studio dei reperti trae notevole vantaggio dalla creazione di archivi digitali consultabili a distanza, facilitando la disponibilità immediata e l'accesso agevole a documentazioni grafiche, schedature analitiche e la raccolta di riferimenti bibliografici (BAGNOLO *ET ALII* 2022). Nel caso di studio che si utilizza come termine di paragone, molto recente poiché risale al 2022, è stato impiegato uno scanner portatile con tecnologia a luce strutturata, nello specifico l'Eva HD prodotto da Artec3D, progettato per la cattura di oggetti di piccole e medie dimensioni, le cui caratteristiche di funzionamento sono del tutto simili allo Scansystem utilizzato per nel rilievo dei bronzi e al Konika Minolta sopra descritto, con la sostanziale differenza che, come vedremo, questa tipologia di strumenti offre maggiore libertà di movimento. Le specifiche tecniche indicano una precisione delle geometrie fino a 0,1 mm e una risoluzione di 0,2 mm, ottimizzabile mediante l'utilizzo dell'intelligenza artificiale (AI). La velocità di acquisizione è regolabile fino a 16 fotogrammi al secondo, con la capacità di registrare fino a 18 milioni di punti al secondo. Per quanto concerne la produzione della *texture*, si fa affidamento su una fotocamera integrata da 1,3 megapixel e una profondità di colore di 24 bpp. Il flusso di lavoro dello scanner Artec3D EVA HD è stato gestito sin dalla fase di acquisizione mediante il software Artec Studio, versione 16. Nonostante la portabilità dello strumento, la mobilità è stata fortemente ostacolata dai cavi necessari per il funzionamento dell'apparecchio. Per superare questa difficoltà, è stato predisposto un set con lo scanner posizionato in modo stazionario e i reperti disposti su un piedistallo a distanza costante. Durante la fase di acquisizione, il reperto è stato fatto ruotare su un piatto girevole e scansionato in diverse posizioni, garantendo così modelli tridimensionali più completi. Dopo la conclusione delle acquisizioni, sono state eseguite le fasi di elaborazione e *post-processing*. Per quanto riguarda la libertà di utilizzo degli strumenti la tecnologia ha permesso negli ultimi anni di arrivare ad avere, come nel caso dell'Artec 3D, scanner che permettono di ruotare attorno all'oggetto, cosa che però non sempre risulta possibile nella pratica; pertanto, l'immobilità delle scansioni eseguite con ZScan, che come descritto in precedenza necessita di essere montato su treppiede o di essere posizionato su un piano, è paragonale a quella del caso di studio analizzato. In questi casi la

fotogrammetria digitale permette di avere maggiore libertà di movimento e di velocizzare l'acquisizione. Successivamente, sono state eseguite le registrazioni in sequenza per ottimizzare l'allineamento dei singoli frame e ridurre il rumore (le imperfezioni della nuvola di punti densa). L'elaborazione della superficie 3D è stata realizzata attraverso il processo di fusione, che combina le diverse scansioni per ottenere il modello tridimensionale risultante. Questa fase finale ha consentito di verificare il risultato preselezionando l'algoritmo più adatto al tipo di manufatto e determinandone l'ordine di risoluzione. In base alla qualità del modello tridimensionale ottenuto, sono stati impiegati strumenti di *post-processing*. La semplificazione della *mesh* è stata eseguita per ridurre il numero di poligoni e alleggerire il modello, mentre la chiusura di eventuali fori ha permesso di colmare le lacune di dimensioni ridotte. La fase di elaborazione si è completata con la proiezione della *texture* del colore sul modello *mesh* e l'esportazione del modello nel formato desiderato. La generazione degli elaborati vettoriali bidimensionali è stata condotta mediante il software Rhino 7 di McNeel, importando il file triangolato e ridisegnando l'oggetto nelle diverse viste convenzionali. Il profilo in sezione è stato riprodotto virtualmente attraverso il taglio della superficie per i piani prescelti. Anche in questo caso si nota come i processi di rilievo, filtraggio della nuvola di punti, elaborazione della *mesh* e *texturing* abbiano subito importanti processi di velocizzazione e automatizzazione, anche con l'ausilio dell'intelligenza artificiale. Tutte le elaborazioni successive come sezioni e restituzione sono state ancora una volta affidate alla manualità dell'operatore/disegnatore. Nella Tabella 8 si è tentato di fare un raffronto basato sui dati raccolti in parte nei casi di studio presentati e in parte nella bibliografia utilizzata come riferimento. La conferma dei risultati ottenuti potrebbe essere confermata esclusivamente da un'indagine empirica.

	ZScan Micro	SfM	Triangolazione
Velocità di acquisizione			X
Libertà di movimento			X
Tempi di calibrazione			X
Necessità di riferimenti metrici	X		X
Precisione	X		X
Tempi di elaborazione		X	X
Versatilità del sistema		X	
Costo di attrezzatura e software		X	

Tabella 8. Confronto ipotetico tra ZScan Micro, *Structure from Motion* (SfM) e 3D scanner a triangolazione nel rilievo dei manufatti in ceramica.

9.2. Il rilievo di 14 statuine in bronzo rinvenute nei siti di Santu Antinu (Genoni) e Domu de Orgia (Esterzili)

Il caso di studio di Domu de Orgia di Esterzili e Santu Antinu di Genoni

Il secondo caso di studio trattato nei capitoli precedenti, si concentra ancora una volta sul rilievo di reperti mobili, ma con obiettivi differenti rispetto al caso delle ceramiche di Corti Beccia di Sanluri. I comuni di Esterzili e Genoni sono stati finanziati entrambi per la produzione di copie fedeli di undici bronzetti provenienti dal tempio a "megaron" di Domu de Orgia e di tre bronzi provenienti dagli scavi del pozzo nuragico di Santu Antinu. Questi reperti sono esposti rispettivamente presso il Museo archeologico nazionale "Giorgio Asproni" di Nuoro e il Museo nazionale archeologico ed etnografico "Giovanni Antonio Sanna" di Sassari. L'obiettivo principale era quello di arricchire l'offerta culturale del territorio attraverso l'esposizione di copie fedeli, permettendo ai visitatori di esplorare il luogo originario del rinvenimento e apprezzare la scena rappresentata dai bronzi. Le copie, realizzate con una stampante 3D a getto di resina ad altissima precisione, sono state successivamente colorate da restauratori esperti per renderle, almeno visivamente, identiche agli originali. In questo caso, sono state utilizzate tre diverse tecnologie per il rilievo: il sistema ZScan Micro, la fotogrammetria digitale (SfM) e lo scanner 3D a luce strutturata. Va sottolineato che gli scanner 3D a luce strutturata più recenti e avanzati, ora più accessibili in termini di costi, come abbiamo visto sia nel caso del Konica Minolta che dell'Artec 3D, consentono un allineamento automatico o semiautomatico delle scansioni o dei modelli acquisiti, garantendo un risultato eccellente e un ulteriore risparmio di tempo. Nel caso in esame, il software utilizzato per l'allineamento delle scansioni è stato CloudCompare. L'analisi della tabella riepilogativa (Tabella 9) mostra che lo scanner 3D è il metodo di acquisizione più veloce, con una media di 19 minuti, seguito dal rilievo fotogrammetrico con 24 minuti e, infine, dal rilievo con ZScan Micro, che richiede 45 minuti. Riguardo all'ottenimento del modello 3D, il 3D scanner e la SfM hanno tempi di elaborazione quasi equivalenti (rispettivamente 38 e 37

minuti), mentre ZScan Micro richiede tempi notevolmente più lunghi, in media 58 minuti, principalmente a causa della generazione delle nuvole di punti. Come spesso accade nei rilievi, gli oggetti morfologicamente complessi richiedono un maggior numero di punti di presa. La complessità delle forme incide sulla tempistica del rilievo e sull'elaborazione, specialmente a causa dei numerosi coni d'ombra che si formano. La qualità delle nuvole di punti è influenzata anche dal colore e dalla riflettività dell'oggetto. Le superfici dei bronzi analizzati presentano caratteristiche decisamente differenti da questo punto di vista. Alcuni sono stati puliti e restaurati in modo approfondito, rendendo le superfici lucide e monocrome, evidenziando i dettagli decorativi. Altri presentano patine superficiali meno approfondite, con tonalità di colore più variegate. La monocromia e la lucentezza del bronzo hanno reso più complesso il rilievo, sia con strumenti fotogrammetrici che con lo scanner 3D. La luce utilizzata per illuminare gli oggetti ha prodotto riflessi difficili da gestire, visibili solo in fase di elaborazione dei dati. Poiché lo scanner a luce strutturata consente una visualizzazione anticipata della nuvola di punti, la correzione della luminosità del proiettore è stata eseguita fin dalle prime scansioni. Inoltre, la necessità di questa correzione è stata riconosciuta solo successivamente nel caso della camera metrica. Questo limite strumentale, comune anche ai 3D scanner a tempo di volo e a differenza di fase, può essere superato in alcuni casi con l'uso di materiali opacizzanti. Tuttavia, a causa delle necessità di tutela, questa soluzione non è stata possibile sui bronzi. Le superfici non restaurate, più opache e con diverse tonalità di colore, sono state rilevate più agevolmente. Un confronto tra le nuvole di punti ha dimostrato che la qualità del rilievo con lo scanner 3D ottico è nettamente superiore, anche nei casi in cui la lucentezza della superficie ha rappresentato un ostacolo durante l'acquisizione. Alcune nuvole rilevate con SfM e ZScan (entrambe utilizzando le stesse fotocamere e ottiche) sono risultate lacunose, richiedendo interventi di *editing* per compensare le mancanze. Di conseguenza, il tempo risparmiato durante l'acquisizione è stato utilizzato in fase di elaborazione, senza riuscire a raggiungere il livello di qualità e precisione dello scanner a luce strutturata. Data la finalità e l'eccezionalità dei reperti oggetto del rilievo, si consiglia l'utilizzo di 3D scanner di alta qualità, nonostante

il costo elevato, per garantire risultati apprezzabili. I modelli ottenuti sono stati prototipati con resine sintetiche di alta qualità, consentendo la stampa in scala 1:1 dei bronzi e delle parti non ancora integrate. Successivamente, restauratori esperti hanno eseguito la colorazione, ottenendo risultati eccellenti. Le scansioni acquisite potrebbero essere impiegate per la prototipazione di nuove copie destinate a esposizioni future, percorsi tattili o sperimentazioni di fusione dei bronzi.

L'analisi del testo fornisce una panoramica dettagliata del processo di rilievo tridimensionale e della successiva elaborazione dei dati ottenuti utilizzando diverse tecnologie. Di seguito, verranno evidenziati alcuni punti chiave:

1. **Tecnologie utilizzate per il rilievo:**

ZScan Micro: acquisizione dei dati più lenta (45 minuti) rispetto agli altri metodi; richiede tempi di elaborazione notevolmente più lunghi per l'ottenimento del modello 3D (58 minuti), con passaggi su almeno 3 *software* differenti: uno per l'acquisizione, un secondo per l'estrazione dei dati metrici, un terzo per l'allineamento e il filtraggio.

Fotogrammetria digitale (SfM): tempo di acquisizione di 24 minuti e tempi di elaborazione simili al 3D scanner (37 minuti). La rapidità è dovuta soprattutto al fatto che si utilizza un unico software per l'allineamento delle immagini l'ottenimento del modello.

Scanner 3D a luce strutturata: il più veloce nell'acquisizione del dato (19 minuti), con tempi di elaborazione quasi equivalenti allo Structure from Motion (38 minuti), con passaggio su due *software*.

2. **Allineamento automatico o semiautomatico:**

Gli scanner 3D a luce strutturata più recenti consentono un allineamento automatico o semiautomatico delle scansioni, garantendo risultati eccellenti e risparmio di tempo. Il software utilizzato per l'allineamento delle scansioni nel caso specifico è CloudCompare.

3. Complessità delle forme e influenze sulla tempistica:

Gli oggetti morfologicamente complessi richiedono un maggior numero di punti di presa, influenzando la tempistica del rilievo e dell'elaborazione. Le superfici dei bronzi figurati analizzati presentano caratteristiche diverse: alcune di esse sono più pulite e lucide, mentre altre presentano patine superficiali, rendendo il rilievo più complesso.

4. Difficoltà legate al colore e alla riflettività:

La monocromia e la lucentezza del bronzo hanno reso più complesso il rilievo, in particolare con strumenti fotogrammetrici e scanner 3D. La gestione dei riflessi più evidenti causati dalla luce utilizzata è stata affrontata mediante correzione della luminosità del proiettore nello scanner a luce strutturata.

5. Qualità del rilievo:

La qualità del rilievo con lo scanner 3D ottico è stata valutata nettamente superiore rispetto alla SfM e allo ZScan Micro, soprattutto in presenza di superfici lucide e di riflessi.

6. Consigli e raccomandazioni:

Data la finalità (prototipazione con stampanti 3D a getto di resina) e l'eccezionalità dei reperti, si consiglia l'utilizzo di 3D scanner di alta qualità nonostante il costo elevato per garantire risultati apprezzabili.

7. Applicazioni future:

Le scansioni acquisite potrebbero essere utilizzate per la prototipazione di nuove copie destinate a esposizioni future, percorsi tattili o sperimentazioni di fusione dei bronzi. Rappresentano, inoltre, un eccezionale documento dello stato di conservazione dei reperti. I micro-rilievi possono rivelarsi particolarmente utili anche per l'analisi del livello qualitativo delle realizzazioni.

	ZScan Micro	SfM	Triangolazione
Velocità di acquisizione			X
Libertà di movimento		X	
Tempi di calibrazione			X
Necessità di riferimenti metrici	X		X
Precisione	X		X
Rilievo di superfici lucide			X
Tempi di elaborazione		X	X
Versatilità del sistema		X	
Costo di attrezzatura e software		X	

Tabella 9. Confronto tra le operazioni di rilievo dei bronzi svolte con ZScan Micro, *Structure from Motion* (SfM) e 3D scanner.

9.2.1. Casi di studio a confronto.

La ricerca dei confronti

Anche per il rilievo dei bronzi la ricerca di confronti specifici non è stata semplice, evidenziando le stesse problematiche del caso analizzato in precedenza. Le difficoltà legate all'utilizzo di 3D laser scanner e fotogrammetria digitale nei materiali metallici ha sicuramente scoraggiato i potenziali utilizzatori; inoltre, l'elevato costo delle attrezzature e la mancanza di un vero e proprio mercato nel settore non ha consentito alle imprese di fare importanti investimenti. Come si è visto nell'analisi del caso di studio sul rilievo dei bronzi le condizioni di luminosità dell'ambiente e la riflettività dell'oggetto incidono pesantemente sulla qualità della nuvola di punti e del rilievo. A tal proposito sono stati selezionati una serie di casi di studio da confrontare a quello in esame, per comprendere lo stato attuale della ricerca.

Il rilievo della situla Arnoaldi

Per le sue caratteristiche e finalità è risultato molto simile allo studio qui presentato quello svolto nel 2011 da Manfredini e Garagnani (MANFerdINI-GARAGNANI 2011). Si tratta del rilievo 3D dalla situla Arnoaldi, un reperto risalente al V secolo a.C., rinvenuto nel 1881 all'interno di una tomba etrusca nella necropoli omonima di Bologna. La situla è composta da una lamina in bronzo con incisioni a sbalzo e un manico in bronzo fuso. La sua superficie conica presenta tre ordini di narrazioni, intervallati da catene di fiori di loto. Queste rappresentazioni includono combattimenti di pugilatori, scene di corse su biga, una parata militare di opliti e cavalieri, e una scena di caccia al cervo. Oltre al valore artistico e documentale, la situla Arnoaldi assume rilevanza per la ricerca proposta grazie alle sue caratteristiche intrinseche tridimensionali, alla complessità delle incisioni e alle peculiari proprietà cromatiche e di riflessione superficiale del materiale utilizzato. Dal punto di vista geometrico, la situla presenta un'altezza di circa 25 cm e un diametro massimo di circa 20 cm. Le incisioni, con dimensioni che variano tra i 0.3 e i 0.5 mm in larghezza e

profondità, rappresentano un elemento cruciale per la sperimentazione proposta. Questa necessità ha guidato la scelta della tecnologia da esplorare nel processo di rilevamento, e pone questo caso di studio come ottimale per un confronto con il rilievo dei bronzi figurati. Per il rilievo geometrico sono stati utilizzati due 3D scanner a triangolazione: il Monolite Vivid 900 e il Perceptron ScanWorks V4i with ROMER Omega bracket, mentre il rilievo fotografico per la successiva texturizzazione è stato eseguito a parte. Le specifiche tecniche degli scanner laser a triangolazione impiegati per il rilievo metrico hanno presentato limitazioni nel rilevare simultaneamente informazioni cromatiche e geometriche. L'acquisizione dell'informazione cromatica attraverso il rilievo fotografico ha richiesto un successivo allineamento dei dati per garantire una corrispondenza accurata tra l'informazione cromatica nelle immagini e i punti della superficie tridimensionale. Nell'utilizzo della *Structure from motion*, dello ZScan e dello Scansystem per il rilievo dei bronzi tale operazione non è stata necessaria, in quanto l'allineamento della *texture* non ha mostrato particolari criticità. La proiezione delle immagini sulla geometria ha permesso di eliminare deformazioni presenti nelle fotografie e le differenze radiometriche dovute a diverse condizioni di illuminazione. Questo processo ha generato un'immagine unificata della superficie esterna della situla. Tale operazione è stata fondamentale per successive elaborazioni grafiche finalizzate a facilitare la lettura della narrazione rappresentata dalle incisioni e potenziarne le capacità comunicative. Nonostante il colore scuro e variegato del metallo del reperto possa rendere difficile la percezione immediata delle figure l'eliminazione delle tre componenti RGB del colore e l'accentuazione delle ombreggiature all'interno delle incisioni tramite l'uso di *shader* di *ambient occlusion* applicati al modello tridimensionale possano evidenziarne i contorni. Nel caso dei bronzi figurati si è preferito operare preventivamente per risolvere questo problema, lavorando in fase di preacquisizione sulla regolazione della luminosità del proiettore, della luce ambientale e della focale della camera metrica. Il rilievo digitale è stato utilizzato, come nel caso dei bronzi, per la realizzazione di un prototipo della superficie della situla, non in resina ma in nylon sinterizzato. La tecnica utilizzata permette di ottenere buoni risultati, anche se per la realizzazione di un

percorso tattile l'utilizzo delle resine epossidiche permette di ottenere dei modelli più resistenti e più precisi.

Il rilievo di una moneta in bronzo con immagini provenienti da un microscopio elettronico

Tra le sperimentazioni recenti uno dei lavori più interessanti di microfotogrammetria è quello svolto da Antinozzi, Ronchi e Barba, che hanno utilizzato le immagini provenienti da un microscopio per l'elaborazione del rilievo tridimensionale di una moneta in bronzo (ANTINOZZI *ET ALII* 2021). Questa sperimentazione risulta essere molto utile nel confronto con la microfotogrammetria dello ZScan Micro e con le tecniche SfM. Questo studio evidenzia ancora una volta come la rapida successione di innovazioni tecnologiche mirate alla digitalizzazione del patrimonio, unita all'incertezza sulle condizioni e sulla continuità della sua fruizione, richieda un approfondimento sulla strutturazione di procedure per il rilievo tridimensionale dei piccoli manufatti. Questa lacuna è particolarmente significativa considerando l'esigenza di acquisire geometrie e superfici altamente uniformi e/o riflettenti, le quali rendono più complesso il riconoscimento dei punti omologhi negli algoritmi di *Structure from Motion* così come nel rilievo con 3d scanner. Le prove sono state condotte utilizzando i microscopi digitali portatili della Dino-Lite, mettendo in luce le potenzialità dell'utilizzo di immagini "micro" anche nel campo del Patrimonio Culturale. Tuttavia, anche in questo caso sono emersi dei limiti che richiedono sviluppi tecnologici, specialmente legati alla profondità di campo e alla conseguente geometria di presa. Questo nuovo studio ha tentato di risolvere le problematiche e migliorare le prestazioni della fotogrammetria micro, ottimizzando le procedure di acquisizione attraverso la progettazione di accessori personalizzati per la microfotogrammetria. I risultati di questo sforzo sono stati conseguiti nell'ambito di un accordo di trasferimento tecnologico, il cui obiettivo è avanzare un protocollo per la documentazione fotogrammetrica di piccoli artefatti. La sperimentazione è avvenuta su un'antica moneta di bronzo proveniente da Velia, antica polis della Magna Grecia oggi appartenente al Parco Archeologico di Paestum e Velia. Si

tratta di una moneta dalle dimensioni di circa 1,2 cm e con un peso di 2,93 g. Questa moneta, scelta per le sue dimensioni e la natura della superficie, presenta al dritto una testa elmata di Atena rivolta verso sinistra e al rovescio un tripode con le lettere “YELH”, che si riferisce al nome greco della città di Velia, derivante dal nome della ninfa Yele. Questo reperto è parte di un gruppo di oltre mille esemplari simili, tutti appartenenti alla stessa produzione e attualmente oggetto di studi. La datazione di tali monete è collocata nella seconda metà del I secolo a.C. Per ottenere delle immagini dettagliate di qualità, il rilievo è stato eseguito utilizzando due microscopi digitali portatili della Dino-Lite⁵¹. È stata utilizzata una piastra calibrata, appositamente progettata dagli autori e realizzata per l'occasione, al fine di ottimizzare le procedure di allineamento e messa in scala del modello tridimensionale. Le caratteristiche della superficie dell'oggetto sono facilmente paragonabili con quelle dei bronzi di Esterzili e Genoni, sia per tipo di materiale che per luminosità e riflettanza della superficie. La presenza di micro-rilievi ha consentito di avere un ottimo termine di paragone. Anche in questo caso è stato evidenziato dagli autori come il problema della riflettività della superficie rappresenti un importante ostacolo nell'utilizzo di tutte le tecniche di rilievo sperimentate, dal 3D scanner alla microfotogrammetria; il risultato non sempre è garantito e la regolazione della luminosità provoca, talvolta, perdite di tempo che vanno calcolate preventivamente alla realizzazione del lavoro. L'utilizzo delle piastre calibrate, sia nella fotogrammetria che nell'utilizzo di 3D Scanner sembra essere particolarmente utile.

Il rilievo con ZScan di lamine e fibule bronzee

Nel 2013 Manganelli Del Fa studia l'utilizzo del sistema ZScan Micro per il rilievo di alcune lamine bronzee; nel 2016 Arrighetti sperimenta l'utilizzo di tale sistema sulla fibula di Montieri, un gioiello rinvenuto in uno strato di fondazione della chiesa presente nell'omonimo castello (ARRIGHETTI *ET ALII* 2016; MANGANELLI DEL FA 2013). Il rilievo è avvenuto con la stessa attrezzatura

⁵¹ www.dino-lite.eu

utilizzata per i bronzi, evidenziando punti di forza e criticità. Anche nella fibula di Montieri, si sono incontrate notevoli difficoltà durante il processo di generazione della nuvola di punti, soprattutto nell'area che costituisce la corona di granato e delle ametiste alternate alle perle di pasta vitrea. La nuvola di punti generata in quest'area è risultata lacunosa e per colmare le parti mancanti, si è scelto di ricorrere a un approccio di modellazione puntuale. Questo ha coinvolto la proposta di una ricostruzione delle gemme, sfruttando la curvatura dei punti generati dal software. Le condizioni lavorative sono state ulteriormente complicate dalle misure di sicurezza adottate per proteggere il gioiello da eventuali danneggiamenti. In particolare, l'illuminazione proveniente da un unico punto situato dietro il manufatto ha accentuato solo alcune sfumature della dettagliata decorazione millimetrica che lo contraddistingue. La mancanza di un treppiede fotografico e l'utilizzo di un cavalletto inclinato con testa mobile hanno aggiunto complessità, poiché si è cercato di posizionare l'apparecchio il più parallelamente possibile alla superficie da fotografare. L'impossibilità di toccare direttamente l'oggetto per adattarlo alle diverse inquadrature ha costituito un ulteriore elemento di difficoltà durante il lavoro sul campo.

9.3. Il rilievo 3D finalizzato allo smontaggio e rimontaggio di una sepoltura eneolitica

Il rilievo della sepoltura di Corti Beccia, finalizzato al montaggio e rimontaggio

Il terzo caso di studio affrontato ha visto l'utilizzo di strumentazione topografica, 3D scanner e fotogrammetrica con una finalità molto particolare: lo smontaggio e il rimontaggio di una sepoltura eneolitica, interrata in una fossa e costruita con lastre di pietra di varie dimensioni. Il procedimento di rilievo ha visto l'impiego di 4 stazioni di presa posizionate attorno alla sepoltura e 2 all'interno di essa. La scelta di una risoluzione finalizzata a ottenere una maglia di punti di circa 2 mm rappresenta un aspetto tecnico cruciale. Questa risoluzione consente di catturare dettagli minuziosi, come piccole pietre e numeri progressivi assegnati agli elementi costruttivi, presenti nella sepoltura. Particolarmente interessante è stato l'approccio senza l'utilizzo di target o punti di riferimento esterni durante il rilievo e l'allineamento delle nuvole di punti. Questo metodo si basa sul riconoscimento manuale di alcuni punti comuni, agevolando una rapida acquisizione dei dati senza preoccupazioni sulla visibilità dei target. Il risultato è una nuvola di punti a colori composta da circa 5.000.000 di vertici. Il processo richiede circa 15 minuti per ogni stazione, con un totale di 90 minuti per il rilievo e un tempo di elaborazione aggiuntivo di circa due ore per allineamento, colorazione e filtraggio dei dati. Questo sottolinea l'efficienza e la rapidità dell'approccio, che minimizza il tempo dedicato all'operazione. Parallelamente, il rilievo con ZScan utilizza un'ottica fissa da 24 mm con 31 punti di stazione, 93 immagini e 31 triplette elaborate. La scelta di attendere un momento della giornata con luce uniforme riflette l'attenzione agli aspetti tecnici, garantendo la qualità delle immagini. La nuvola di punti risultante comprende 7.188.604 vertici, ma solo 11 scansioni sono state utilizzate nel modello finale, riducendo il numero di vertici a 2.737.788 dopo l'eliminazione manuale dei punti in eccesso. Il rilievo *Structure from Motion* (SfM) è stato notevolmente veloce, richiedendo solo 20 minuti per il rilievo sul campo. L'elaborazione di nuvole, mesh e modello texturizzato con Agisoft Metashape ha richiesto ulteriori 35 minuti, dimostrando un'elevata rapidità di esecuzione.

ed elaborazione. L'integrazione dei dati provenienti da diverse fonti, come i rilievi con 3D scanner e ZScan, è avvenuto senza scalare i modelli, mantenendo la coerenza delle misure. L'utilizzo di nuvole di punti allineate con CloudCompare ha garantito un livello di sovrapposizione molto buono, con discostamenti delle linee di sezione inferiori al centimetro. L'approccio alla fase successiva del lavoro, che include l'acquisizione di immagini di dettaglio, la rimozione degli elementi lapidei e la scansione della buca lasciata dalla sepoltura, evidenzia l'attenzione ai dettagli e la pianificazione accurata delle operazioni.

Rilievo con 3D laser scanner TOF

L'esperimento ha fornito dettagli su un processo di rilievo utilizzando uno scanner 3D terrestre. Di seguito, se ne analizzeranno gli aspetti tecnici e i risultati.

1. **Metodologia di rilievo:** Il rilievo è stato effettuato con uno scanner 3D terrestre, posizionando lo strumento sia intorno alla sepoltura (4 stazioni di presa) che all'interno di essa (2 stazioni). Questa scelta ha permesso di ottenere una rappresentazione completa dell'oggetto di studio. Il rilievo è avvenuto in maniera abbastanza rapida, con una copertura pressoché completa delle superfici.
2. **Parametri di risoluzione:** La risoluzione è stata impostata in modo da ottenere una maglia di punti con una precisione di circa 2 mm. Questo livello di dettaglio è stato selezionato per garantire la capacità di riconoscere anche le pietre più piccole e, in alcuni casi, di leggere i numeri progressivi assegnati agli elementi costruttivi. La risoluzione della maglia di punti si è rivelata idonea alla finalità, poiché ha permesso di ottenere un modello dettagliato di ogni singolo elemento costruttivo e, allo stesso tempo, gestibile e visualizzabile senza particolari problematiche nel software.
3. **Utilizzo delle stazioni di presa:** Le 4 stazioni di presa posizionate intorno alla sepoltura e le 2 all'interno hanno contribuito a catturare l'oggetto da diverse angolazioni, migliorando la completezza del rilievo. È stato ottenuto un modello con vaste aree di sovrapposizione, che da un lato hanno agevolato l'allineamento delle scansioni, dall'altro hanno reso necessarie una serie di operazioni di filtraggio, sia automatiche che manuali, per rendere chiara e ordinata la nuvola di punti.
4. **Assenza di target esterni:** Non sono stati utilizzati target esterni o punti di riferimento durante il processo di scansione. Invece, è stato adottato un approccio basato sul riconoscimento manuale di alcuni punti comuni tra le diverse scansioni. Questo ha contribuito a una rapida acquisizione

dei dati, evitando possibili perdite di tempo associate alla visibilità dei target e riducendo il rischio di differenze di luminosità tra le nuvole di punti. Il processo di registrazione ha richiesto più tempo per l'assenza di target.

5. **Velocità di acquisizione dei dati:** Il processo di rilievo è stato rapido, con un tempo stimato di circa 15 minuti per ogni stazione e un totale di 90 minuti per completare l'intero rilievo. Questa efficienza è essenziale per ridurre il tempo di acquisizione dei dati in situ.
6. **Elaborazione post-rilievo:** Le tempistiche di elaborazione hanno richiesto circa due ore. L'uso della colorazione può essere particolarmente utile per una rappresentazione visiva più ricca.
7. **Risultati ottenuti:** Il risultato finale è una nuvola di punti a colori composta da circa 5.000.000 di vertici, che fornisce una rappresentazione tridimensionale dettagliata dell'oggetto studiato.

Rilievo con ZScan

1. Configurazione hardware:

L'acquisizione dei dati è stata effettuata con un'ottica fissa da 24 mm. Sono state utilizzate 31 stazioni di scansione con un totale di 93 immagini e 31 triplette elaborate. Questo ha consentito di ottenere una copertura dettagliata dell'oggetto rilevato. L'hardware è pratico, leggero, facilmente trasportabile anche in campagna. L'unica limitazione è data dall'utilizzo della barra graduata negli spazi ristretti, come l'interno della sepoltura.

2. Illuminazione e momento della giornata:

È stato necessario attendere un momento della giornata in cui la luce fosse uniforme, al fine di evitare ombre proiettate sulla superficie. Questo approccio indica che deve esservi sempre, soprattutto nei rilievi all'aperto, l'attenzione alla qualità dell'illuminazione, essenziale per ottenere dati accurati. Talvolta si può fare ricorso all'uso di teli ombreggianti o coperture.

3. Dimensioni della nuvola di punti:

Il risultato finale è una nuvola di punti con 7.188.604 vertici. Tuttavia, per ottimizzare l'elaborazione e ridurre la complessità, solo 11 delle 31 scansioni sono state utilizzate nel modello finale, portando a 2.737.788 vertici. Dopo l'eliminazione manuale dei punti in eccesso e il filtraggio spaziale delle aree di sovrapposizione, il modello è stato ridotto a 1.674.129 vertici. Questi rappresentano i dati effettivamente utili per gli scopi del lavoro. Il numero dei punti è ridotto rispetto al modello ottenuto con 3D scanner, ma la qualità è comunque accettabile.

4. Durata del rilievo:

Il processo di rilievo ha richiesto 80 minuti complessivi. Nonostante l'elevato numero di stazioni, gli spostamenti della strumentazione sono stati come agevoli e veloci, con acquisizioni di triplette che richiedevano solo pochi secondi. Il tempo necessario è quindi paragonabile, almeno in questo caso, a quello del 3D scanner.

5. Elaborazione delle nuvole di punti:

Il calcolo delle nuvole di punti, considerando una maglia prevista di 1 punto ogni 40 pixel, ha richiesto 40 minuti utilizzando il software ZScan. Questa fase include anche il tempo necessario all'esportazione dei dati. L'allineamento delle nuvole di punti e le operazioni di ritaglio e filtraggio con CloudCompare hanno richiesto ulteriori 60 minuti. Anche in questo caso il dato sembra essere in linea con quello del 3D scanner.

In sintesi, il processo di rilievo con ZScan è stato accuratamente pianificato e attuato, con particolare attenzione alla configurazione hardware, all'illuminazione, e alla gestione dei dati acquisiti. L'eliminazione manuale dei punti in eccesso e il filtraggio sono state fasi cruciali per ottenere un modello ottimizzato per gli scopi del lavoro. La durata complessiva del rilievo e dell'elaborazione dei dati sembra essere stata gestita con efficienza, tenendo conto delle complessità della struttura documentata.

Rilievo SfM

L'esperimento condotto ha permesso di descrivere il processo di rilievo eseguito tramite *Structure from Motion* (SfM) utilizzando una camera terrestre, ma che si sarebbe potuto condurre anche con un drone.

1. Velocità di esecuzione del rilievo sul campo:

Il rilievo con SfM ha richiesto solo 20 minuti sul campo. Questa rapidità può essere attribuita all'efficienza di esecuzione del processo di *Structure from Motion*. In questo caso si nota, da subito, come questa tecnica abbia permesso di ottenere una tempistica decisamente ridotta rispetto a 3D scanner terrestre e a ZScan.

2. Elaborazione con Agisoft Metashape:

L'elaborazione della nuvola di punti, mesh e modello texturizzato con Agisoft Metashape è stata completata in 35 minuti. La velocità di questa fase può essere considerata notevole e riflette la potenza di elaborazione del software utilizzato. Anche in questo c'è stato un risparmio di tempo importante.

3. Assenza di riferimenti esterni:

Una caratteristica interessante è l'assenza di riferimenti esterni come target o stadie. Questo è possibile grazie al fatto che il modello è stato scalato durante l'allineamento con la nuvola di punti ottenuta da uno scanner 3D. Questo approccio semplifica notevolmente il processo, contribuendo alla velocità di esecuzione. In questo caso si nota come un rilievo di appoggio eseguito con altra strumentazione possa essere molto utile.

4. Possibilità di utilizzare le stesse immagini di ZScan:

Le stesse immagini rilevate con ZScan, utilizzando la stessa fotocamera e obiettivo su un treppiede stabile, sono state utilizzate per l'elaborazione con Agisoft Metashape. L'utilizzo di una parte delle immagini acquisite con ZScan ha contribuito alla riduzione del tempo di elaborazione.

Sovrapposizione dei rilievi

Di seguito le fasi di allineamento delle nuvole di punti ottenute da differenti sistemi, insieme a un'ulteriore analisi tecnica dei processi utilizzati:

1. Allineamento con CloudCompare:

I dati acquisiti con 3D scanner sono stati elaborati con il software proprietario Trimble RealWorks, ottimizzato per gestire nuvole di punti di grandi dimensioni. Per le immagini acquisite con fotocamera sono stati utilizzati i software ZScan (per le triplette acquisite con barra graduata) e Agisoft Metashape per le immagini senza riferimenti. Tutti e tre i programmi permettono di esportare nuvole di punti e modelli in vari formati, condivisibili con l'*open source* Cloud Compare. I formati più utilizzati sono stati .e57 per le nuvole di punti generate con 3D scanner, .asc per lo ZScan e .obj per Agisoft Metashape. Le nuvole di punti sono state allineate utilizzando il software CloudCompare. Questo strumento è ampiamente impiegato per confrontare e combinare dati provenienti da diverse fonti.

2. Allineamento tra 3D scanner e ZScan:

L'allineamento delle nuvole di punti provenienti da 3D scanner e ZScan è stato eseguito senza scalare il secondo modello. Questo è reso possibile dalla natura dei due sistemi che non richiedono riferimenti esterni. L'uso delle misure presenti nella nuvola di punti ha garantito un'accurata sovrapposizione senza distorsioni scalari. Entrambi i sistemi si sono rivelati molto precisi, tanto che la sovrapposizione ha dato errori decisamente trascurabili. La possibilità di eseguire rilievi senza riferimenti esterni, solitamente rilevati con strumentazione topografica, permette di velocizzare le operazioni sul campo.

3. Fattore di scala da Agisoft Metashape:

Nel caso del modello ottenuto con Agisoft Metashape, il fattore di scala è stato ottenuto direttamente dalle misure rilevate con il 3D scanner. Questo approccio garantisce la coerenza dimensionale tra i diversi modelli e riduce la possibilità di errori scalari durante la fusione dei dati. L'esecuzione di rilievi con *Structure*

from Motion rende necessaria l'acquisizione di riferimenti esterni, salvo utilizzare droni dotati di ricevitore DGPS integrato.

4. Livello di sovrapposizione:

Il livello di sovrapposizione tra i modelli è molto buono, con discostamenti delle linee di sezione inferiori al centimetro. Questa precisione è giudicata più che sufficiente per gli obiettivi del lavoro, suggerendo che i dati integrati sono coerenti e accurati. Questo significa che tutte le tecniche utilizzate nel caso di studio sono applicabili a questo genere di rilievo.

5. Acquisizione di immagini dettagliate:

L'acquisizione di numerose immagini di dettaglio di ogni singola pietra prima, durante e dopo la rimozione è un passaggio chiave per semplificare il riconoscimento e la catalogazione. Queste immagini forniscono un contesto visivo per comprendere meglio la struttura e le caratteristiche delle pietre, facilitando la successiva analisi.

6. Scansione della buca lasciata dalla sepoltura:

Dopo la rimozione degli elementi lapidei, è stata eseguita un'ulteriore scansione all'interno della buca lasciata dalla sepoltura. La restituzione grafica del negativo dell'opera è stata quindi utilizzata per ricreare un alloggiamento con dimensioni e forma adeguate nella nuova sede della sepoltura.

In conclusione, il processo di allineamento delle nuvole di punti è fondamentale per garantire la coerenza spaziale tra i dati provenienti da diverse fonti. L'approccio senza scalare il secondo modello è possibile grazie alla caratteristica dei sistemi utilizzati. La buona sovrapposizione, la precisione dichiarata e l'approccio dettagliato all'acquisizione e all'analisi delle immagini dimostrano una metodologia robusta per il rilievo e la documentazione di dettagli architettonici o archeologici.

	TOF	ZScan	SfM
Velocità di acquisizione			X
Libertà di movimento			X
Necessità di riferimenti metrici	X	X	
Precisione	X		
Dipendenza da condizioni ambientali	X		
Tempi di elaborazione			X
Versatilità del sistema	X		X
Costo di attrezzatura e software			X

Tabella 10. Confronto tra scanner a tempo di volo (TOF), ZScan e *Structure from motion* nel rilievo di una sepoltura.

9.4. Il rilievo 3D finalizzato alla progettazione del restauro di un tempio nuragico

Il rilievo del tempio a megaron di Domu de Orgia, Esterzili, finalizzato alla progettazione di un intervento di restauro conservativo

Il quarto caso di studio affrontato ha visto l'utilizzo di strumentazione topografica, 3D scanner TOF e a differenza di fase, fotogrammetria digitale finalizzata ad un intervento di restauro conservativo, e in parte di anastilosi, di un tempio a *megaron*, sito in territorio di Esterzili, in cui sono state rinvenute le undici statuine in bronzo oggetto del precedente caso di studio. L'intervento di restauro del tempio nuragico di Domu de Orgia ha rappresentato un'eccellente dimostrazione dell'applicazione di avanzate tecnologie di rilievo tridimensionale, sottolineando l'importanza di un approccio tecnico integrato per la conservazione e la valorizzazione del patrimonio archeologico. Durante la fase di progettazione, un 3D laser scanner a tempo di volo (TOF) Menci GS100 è stato impiegato per acquisire una rappresentazione dettagliata delle condizioni preesistenti del monumento. La precisione del TOF Menci GS100 ha fornito una base di riferimento cruciale per la pianificazione dell'intervento, garantendo una comprensione completa delle condizioni iniziali del tempio. La raccolta di dati dettagliati è stata fondamentale per la definizione di strategie mirate durante la fase di restauro. Successivamente, dopo il completamento degli interventi di restauro, è stato impiegato un 3D scanner a differenza di fase Faro Focus 120 per documentare le modifiche apportate e verificare la riuscita degli interventi. Questa fase post-restauro ha permesso una valutazione accurata del successo del ripristino, evidenziando eventuali differenze tra lo stato iniziale e quello finale del tempio. Le nuvole di punti acquisite sono diventate un prezioso strumento di monitoraggio nel tempo, fornendo dati basilari per valutare l'efficacia delle decisioni prese durante il restauro e garantendo la durabilità delle modifiche apportate. Parallelamente, è stata adottata la metodologia del rilievo aerofotogrammetrico con la tecnica *Structure from Motion* (SfM), eseguito dopo il restauro. Questo approccio innovativo ha

sfruttato immagini aeree per generare modelli tridimensionali, offrendo una visione globale della struttura e delle sue relazioni con l'ambiente circostante. L'utilizzo di tecnologie aerofotogrammetriche ha aggiunto un ulteriore strato di dettaglio e comprensione alla documentazione del tempio, consentendo una visione più ampia delle dinamiche architettoniche e ambientali. L'approccio multidisciplinare, che ha combinato dati provenienti da diverse fonti, ha permesso una valutazione completa e dettagliata del restauro del tempio nuragico. La convergenza di informazioni dai rilievi laser a tempo di volo, dagli scanner a differenza di fase e dalle tecnologie aerofotogrammetriche ha fornito un quadro completo dello stato del monumento prima, durante e dopo il restauro. Questa integrazione ha agevolato la comprensione delle dinamiche strutturali, aprendo la strada a future ricerche e interventi più mirati nella conservazione del patrimonio archeologico di Esterzili. L'applicazione di tecnologie avanzate di rilievo tridimensionale ha giocato un ruolo fondamentale nel successo delle operazioni di restauro, fornendo una base solida per decisioni informate e garantendo la preservazione delle testimonianze storiche per le generazioni future.

Rilievo prima del restauro con 3D laser scanner TOF

1. Pianificazione e Distribuzione delle Attività:

Ogni intervento di rilievo di un bene archeologico necessita di una pianificazione attenta e di una distribuzione efficace delle attività. Sono state necessarie due giornate di lavoro e due operatori specializzati per garantire completezza e dettaglio nel rilevamento.

2. Fasi del processo di rilievo:

Ogni punto di stazionamento ha richiesto 45 minuti, suddivisi in 15 minuti per il posizionamento e la collocazione dei *markers* riflettenti e 30 minuti per l'acquisizione dei dati. L'uso del 3D laser scanner permette di selezionare l'area di interesse delimitandola a video, sfruttando la videocamera real-time integrata e il PC o palmare collegato in rete.

3. Quantità di punti raccolti:

Durante il processo di scansione, sono stati rilevati inizialmente 17 milioni di punti, evidenziando l'attenzione al dettaglio nella cattura di ogni aspetto significativo del monumento. Un'eliminazione dei punti superflui, sia con procedure automatizzate che manuali, ha ridotto il totale a circa 13 milioni di punti, ottimizzando l'utilizzo dei dati.

4. Software e riduzione dei punti:

Il software utilizzato per le operazioni di allineamento e semplificazione è RealWorks Survey. Il numero finale di punti per ogni scansione si attesta a circa 570.000, indicando la densità di informazioni raccolte e la capacità del dispositivo di generare modelli tridimensionali dettagliati.

5. Precisione e minuziosità del processo:

Si evidenzia la necessità di precisione e minuziosità nel processo, cruciali per garantire una rappresentazione accurata del monumento e facilitare l'interpretazione dei dati. L'impiego di due giornate di lavoro e due operatori ha permesso di ottimizzare il tempo e affrontare eventuali imprevisti, contribuendo alla qualità complessiva del rilievo.

6. Flessibilità e risposta alle variabili ambientali:

La distribuzione delle attività su due giorni e l'impiego di due operatori contribuiscono a una maggiore flessibilità nel processo, consentendo una risposta adeguata alle variabili ambientali e strutturali.

7. Rappresentazione finale:

La distribuzione attenta delle attività, l'attenzione ai dettagli nei tempi di posizionamento e acquisizione, e la gestione accurata dei dati sono considerati aspetti critici. Il risultato finale di 570.000 punti per ogni scansione conferma l'efficacia del rilievo tridimensionale nel fornire una rappresentazione dettagliata e completa del monumento oggetto di studio.

Rilievo eseguito dopo il restauro con 3D laser scanner a differenza di fase

Utilizzo del Faro Focus 120 per il Rilievo Post-Restaurazione:

1. Scelta del nuovo strumento:

È stata sperimentata l'adozione del 3D laser scanner Faro Focus 120 dopo il restauro della parete est del monumento, con cui si evidenziano vantaggi significativi in termini di efficienza e praticità rispetto al precedente Menci GS 100.

2. Tecnologia a differenza di fase e vantaggi operativi:

La tecnologia a differenza di fase del Faro Focus 120 migliora l'efficienza rispetto al suo predecessore; la leggerezza (5 kg) contribuisce a una maggiore mobilità e facilità di manovra, semplificando le movimentazioni degli operatori e riducendo i rischi soprattutto nel posizionamento sopra le murature, riducendo il anche il rischio di danni strutturali.

3. Batteria integrata e autonomia energetica:

La batteria al litio integrata e intercambiabile offre un'autonomia di circa quattro ore, eliminando la necessità di una fonte di alimentazione esterna e migliorando la flessibilità sul campo.

4. Monitor integrato e semplificazione delle operazioni:

Il monitor integrato semplifica l'interazione senza la necessità di collegamenti esterni, riducendo i tempi di configurazione e assicurando un flusso di lavoro più fluido. Permette, inoltre, di fare una verifica immediata della buona riuscita delle scansioni.

5. Riduzione dei tempi di rilievo:

L'adozione del Faro Focus 120 ha comportato una notevole riduzione dei tempi di acquisizione, con stazioni di acquisizione che richiedevano in media 15 minuti ciascuna.

6. Riconoscimento dei *markers* e sicurezza nel posizionamento:

La non necessità di scansioni individuali dei *markers* durante il rilievo semplifica il processo di acquisizione.

7. Conclusioni sulla fase di rilievo:

L'adozione del Faro Focus 120 ha rappresentato una significativa evoluzione nelle operazioni di rilievo post-anastilosi, contribuendo a un processo più efficiente e meno invasivo.

Parte 2: Post-Elaborazione dei dati con faro scene:

1. Allineamento delle scansioni e software faro scene:

Il software Faro Scene è impiegato in modo analogo a RealWorks Survey, offrendo diverse modalità di allineamento.

2. Flessibilità nell'allineamento:

La modalità automatica con markers rilevati e riconosciuti ha garantendo una sincronizzazione rapida e accurata. È stata utilizzata, quando necessario, una modalità manuale con riconoscimento visivo dei punti di riferimento sulla nuvola di punti o sull'immagine panoramica, per un intervento più specifico.

3. Integrazione delle Immagini catturate dal Faro Focus:

Le immagini catturate dalla fotocamera integrata ha arricchito il set di dati con informazioni visive dettagliate. Il riconoscimento visivo dei punti di riferimento sulla nuvola di punti ha migliorato ulteriormente il processo di allineamento.

4. Gestione dei dati densi e formato .rcp:

L'integrazione delle immagini ha contribuito all'ottenimento di una nuvola di punti più fitta e densa, richiedendo una semplificazione per una gestione più agevole. L'esportazione della nuvola di punti in formato .rcp, compatibile con Autodesk Recap e AutoCAD, ha facilitato l'integrazione dei dati nelle piattaforme di progettazione avanzate.

5. Produzione di documentazione grafica aggiornata:

L'utilizzo del formato .rcp ha agevolato la produzione di documentazione grafica aggiornata, con la generazione di prospetti, sezioni e piante che riflettono lo stato attuale del monumento dopo il restauro.

6. Risultati della post-elaborazione:

L'integrazione delle tecnologie avanzate di allineamento nel software Faro Scene, insieme all'uso strategico delle immagini catturate dal Faro Focus, rappresenta un passo significativo nella post-elaborazione dei dati tridimensionali del monumento.

L'esperimento ha evidenziato un approccio integrato dall'uso del Faro Focus 120 nel rilievo e del software Faro Scene nella post-elaborazione, dimostrando l'efficacia e la coerenza di tutta la procedura. La scelta oculata delle tecnologie e dei formati di esportazione riflette un processo mirato a ottenere dati accurati e documentazione grafica aggiornata.

Rilievo aerofotogrammetrico digitale con drone eseguito dopo il restauro

A distanza di qualche anno si è deciso di utilizzare la tecnologia aerofotogrammetrica tramite drone per valutare lo stato di conservazione del monumento dopo la conclusione dei lavori di restauro.

1. Rilevamento con drone DJI air 2s:

Per il rilevamento è stato utilizzato il drone DJI Air 2S: la metodologia comune dei piani di volo ha seguito le regole principali della fotogrammetria aerea, con scatti da diverse angolazioni per ottenere una copertura completa.

2. Ripristino dei punti di riferimento:

Prima del rilevamento, è stato necessario ripristinare alcuni dei punti di riferimento utilizzati in passato, utilizzando strumenti topografici. Questo passo è cruciale per ottenere una misurazione accurata e permette di mantenere coerenza nei dati con i rilevamenti precedenti.

3. Numero di immagini e software utilizzato:

Sono state acquisite 120 immagini durante l'operazione con il drone, e il software Agisoft Metashape è stato utilizzato per elaborare i dati. Sono state generate diverse tipologie di modelli: una nuvola di punti densa, mesh triangolata e texturizzata, ortofoto con viste dall'alto e frontali.

4. Allineamento del modello fotogrammetrico con altri modelli:

Erano possibili due opzioni per orientare il modello ottenuto dalla tecnologia aerofotogrammetrica rispetto ai modelli ottenuti da 3D laser scanner. Le opzioni sono l'inserimento delle coordinate dei *markers* o l'allineamento manuale utilizzando un software terzo. È stata scelta un'opzione mista: il riconoscimento manuale del punto utilizzando i *markers* meglio visibili.

5. Utilizzo di Cloud Compare per allineamento manuale:

L'allineamento manuale è stato eseguito con il software open source Cloud Compare. Questa scelta è stata fatta per semplificare e velocizzare le operazioni di calcolo del modello su Agisoft Metashape.

6. Considerazioni sull'allineamento e risultati ottenuti:

L'utilizzo di markers ben visibili sulla texture semplifica l'allineamento manuale durante il processo di calcolo del modello. I risultati ottenuti dal rilevamento con drone sono utilizzati come termini di paragone con i precedenti rilevamenti ottenuti da 3D laser scanner.

7. Considerazioni sulla Velocità e Semplificazione Operativa:

L'approccio scelto ha permesso di velocizzare le operazioni di calcolo e semplificare il processo di allineamento, contribuendo a un flusso di lavoro più efficiente.

In sintesi, si è sperimentato un processo completo di rilevamento e valutazione dello stato di conservazione di un monumento utilizzando la tecnologia aerofotogrammetrica tramite drone. È stata data particolare attenzione al

ripristino dei punti di riferimento, ai dettagli del drone utilizzato, ai piani di volo adottati, al software utilizzato per l'elaborazione dei dati, e alla scelta dell'allineamento del modello fotogrammetrico rispetto ai modelli ottenuti da 3D laser scanner. La decisione di semplificare il processo di calcolo utilizzando Cloud Compare evidenzia una strategia operativa mirata a garantire efficienza e coerenza nei risultati ottenuti.

	TOF	Differenza di fase	SfM da drone
Velocità di acquisizione		X	
Libertà di movimento			X
Necessità di riferimenti metrici	X	X	
Precisione	X	X	
Dipendenza da condizioni ambientali	X	X	
Tempi di elaborazione			X
Versatilità del sistema		X	
Costo di attrezzatura e software			X

Tabella 11. Tabella comparativa tra 3D laser scanner TOF, 3D scanner a differenza di fase e *Structure from Motion* nel rilievo del tempio di Domu de Orgia.

9.5. L'utilizzo di 3D scanner, ZScan, SfM terrestre e da drone, camere 360 per la documentazione dell'indagine archeologica e del restauro di un insediamento di età Tardoantica

La documentazione di un insediamento vasto come quello di Fusti'e Carca ha richiesto l'utilizzo di svariate tecniche di documentazione e misura: quelle più conosciute e tradizionali (compreso il rilievo manuale e con strumentazione topografica), quelle oramai consolidate (3D laser scanner e fotogrammetria digitale) e quelle che rappresentano ancora un elemento di novità (la *Structure from Motion* con camere 360). Il progetto, sviluppato nell'arco di circa un anno, ha coinvolto un'area suddivisa in quarantaquattro ambienti con caratteristiche, dimensioni e problematiche eterogenee. Le criticità e le esigenze del progetto erano molteplici: era necessario documentare in modo parallelo e rapido le attività di scavo e restauro in un'area di circa 2.500 metri quadrati, di cui 1.300 metri quadrati occupati dal complesso archeologico. Dovevano essere rilevate, prima e dopo gli interventi, 126 unità stratigrafiche murarie con problematiche differenziate, e i dati dovevano essere elaborati rapidamente per consentire un flusso continuo di lavoro. La verifica dei dati doveva avvenire velocemente, considerando che la copertura successiva del sito avrebbe impedito correzioni o integrazioni. Per affrontare questa complessità, è stata adottata una strategia basata sull'utilizzo di diverse tecniche di rilievo, integrandole in un approccio multidisciplinare. La fase iniziale ha previsto l'utilizzo di uno strumento GPS per la creazione di una rete geodetica su tutto il terreno da indagare. Questa rete, materializzata con chiodi topografici e picchetti, è stata utilizzata come base per le successive fasi di documentazione. Successivamente, sono stati effettuati voli con drone, utilizzando la fotogrammetria aerea per generare modelli 3D texturizzati e ortofoto quotate. Questo approccio ha permesso di coprire aree estese e di ottenere una visione globale del sito, integrando dati dettagliati acquisiti tramite altre tecniche. La metodologia di volo è stata progettata in base alle specifiche esigenze, con diverse quote di volo e immagini oblique per

catturare dettagli da angolazioni diverse. In aggiunta, sono stati impiegati dispositivi di acquisizione sferica come la camera Panono 360, consentendo una rapida documentazione di ambienti piccoli e complessi. Questa tecnologia ha dimostrato di essere efficace nella generazione di modelli tridimensionali in breve tempo, risultando particolarmente adatta per catturare dettagli nei pavimenti e nei soffitti degli ambienti. Il rilievo di dettaglio delle strutture murarie è stato eseguito attraverso l'utilizzo di uno scanner 3D a differenza di fase. Anche il sistema ZScan si è dimostrato particolarmente utile per catturare elevati murari inquadrabili frontalmente senza ostacoli visivi significativi. La precisione ottenuta dallo scanner 3D ha contribuito a documentare con accuratezza lo stato di fatto delle murature e è stata fondamentale nel processo di restauro. Inoltre, il rilievo aerofotogrammetrico è stato affiancato dall'utilizzo di GPS differenziale, costituito da stazione base e dispositivo mobile. Questo approccio ha garantito un'ottima precisione e una maggiore libertà di movimento su tutta l'area, risultando particolarmente efficace nel rilevare limiti e quote delle unità stratigrafiche. La documentazione dettagliata di singole unità stratigrafiche è stata eseguita con un approccio integrato, combinando diverse tecniche di rilievo. Il processo di post-elaborazione è stato altrettanto cruciale, coinvolgendo diversi software specializzati per l'analisi e la visualizzazione dei dati acquisiti. Il 3D laser scanner, in particolare, è stato utilizzato per ottenere un rilievo finale dettagliato di tutti gli ambienti, con numerose stazioni di presa per garantire una copertura completa. La nuvola di punti risultante è stata la base per l'orientamento di tutti gli altri modelli generati dalle diverse tecniche di documentazione. L'integrazione di queste diverse metodologie di rilievo ha fornito una documentazione completa e dettagliata del sito archeologico, consentendo una comprensione approfondita delle strutture e delle stratificazioni presenti. L'uso combinato di GPS, drone, fotogrammetria, scanner 3D e fotocamera sferica ha dimostrato l'efficacia di un approccio globale nell'affrontare le necessità documentative di un progetto complesso come quello di Fusti 'e Carca.

Il rilievo con strumentazione topografica DGPS

1. Fase Iniziale di rilievo e pulizia del terreno:

L'uso di strumentazione GPS si rende necessario per la realizzazione di una rete geodetica su un'area di circa 2.500 metri quadrati. Le prime operazioni di rilievo sono iniziate dopo la pulizia superficiale dalla vegetazione presente nel sito.

2. Realizzazione della Rete Geodetica:

La rete geodetica è stata realizzata con l'inserimento di chiodi topografici, picchetti e target, al fine di indagare il terreno e verificare la presenza di resti archeologici. I target sono stati utilizzati per le riprese fotogrammetriche (da drone o terrestri) e come punti di riferimento per il 3D laser scanner.

3. Tipologie di target utilizzati:

I target utilizzati sono di due tipi: quelli in plastica dura, circolari e colorati per una buona visibilità da drone, e quelli riflettenti, utilizzati per le riprese fotogrammetriche e per georiferire le stazioni del 3D laser scanner.

4. GPS differenziale (DGPS):

Il GPS differenziale è stato implementato utilizzando un sistema composto dalla stazione base e da un dispositivo mobile (*rover*). Tale scelta si è rivelata appropriata per ottenere un'elevata precisione e una totale libertà di movimento su tutta l'area, senza alcuna dipendenza dalle reti fisse.

5. Vantaggi del GPS differenziale:

L'uso del DGPS è stato preferito rispetto a una stazione totale, in quanto ha permesso una maggiore mobilità sull'intera area di rilevamento. È stato particolarmente utile per rilevare i limiti e le quote iniziali e finali delle unità stratigrafiche, oltre al posizionamento dei reperti archeologici più significativi.

6. Ruolo chiave del DGPS nel rilevamento archeologico:

Il DGPS ha giocato un ruolo fondamentale nella fase iniziale del rilievo, contribuendo alla precisione nelle misurazioni e nella localizzazione dei reperti. Ha fornito un'ottima precisione per determinare i limiti e le quote delle unità stratigrafiche, aspetti critici nell'ambito archeologico.

Si evidenzia come l'utilizzo di strumentazione DGPS, la realizzazione di una rete geodetica, *target* di diversi tipi hanno permesso una copertura completa dell'area di rilievo con elevata precisione. L'adozione del DGPS ha dimostrato di essere una scelta appropriata, fornendo la precisione e la mobilità necessarie per il rilievo in un'area di dimensioni considerevoli. La diversificazione dei *target* riflettenti e non riflettenti dimostra un approccio flessibile in base alle diverse fasi del processo di rilievo.

Rilievo aerofotogrammetrico digitale con drone

La sperimentazione prosegue con un rilievo aerofotogrammetrico digitale di tutta l'area eseguito con drone in più fasi. Vengono utilizzati un drone DJI Air 2S per il rilievo e Agisoft Metashape per l'elaborazione dei dati, dal calcolo della nuvola densa fino all'ortofoto.

1. Piani di volo e fotogrammetria aerea:

I piani di volo adottati hanno seguito le principali regole della fotogrammetria aerea. L'utilizzo di fotografie oblique e l'opportunità di effettuare voli al tramonto per ottenere una luminosità uniforme senza ombre sono stati fondamentali per l'ottenimento di un buon risultato. La quantità di immagini acquisite durante diversi voli supera le 700 immagini in un volo specifico. Questo ha portato a un'enorme quantità di dati, con oltre 5.000 foto aeree acquisite ed elaborate nel corso di tutta la campagna.

2. Dettagli su un caso esemplificativo:

È stata fornita una descrizione specifica del rilievo della "US 47" all'interno dell'ambiente I, con dettagli sui modelli ottenuti e l'uso di *target* sulle murature

per l'orientamento. L'operazione eseguita sulla US 47 è stata ripetuta più volte su altre murature e ha permesso, in alcuni casi, operazioni di anastilosi dei tratti murari incompleti.

3. Efficienza e tempistiche del rilievo:

Si sottolinea l'efficienza e la velocità del rilievo aerofotogrammetrico, consentendo alla squadra impegnata nello scavo di non interrompere le operazioni. Si evidenziano, inoltre, i vantaggi rispetto al rilievo manuale o strumentale punto-punto, sottolineando una riduzione significativa del tempo necessario e la possibilità di eseguire il rilievo con un solo operatore.

4. Fasi di post-elaborazione e software utilizzati:

Viene descritto il processo di post-elaborazione, coinvolgendo diverse fasi e l'uso di sei software differenti. I software utilizzati includono GeoPro Mercurio, Agisoft Metashape, CloudCompare, Faro Scene e AutoCAD. Questo fa comprendere come la formazione di un archeologo rilevatore debba seguire dei percorsi specifici.

La sperimentazione ha consentito di ottenere una panoramica dettagliata del processo di rilievo aerofotogrammetrico, sottolineando l'efficacia, l'efficienza e la quantità significativa di dati acquisiti. L'approccio integrato di diverse metodologie e l'uso di vari software dimostrano un approccio completo e avanzato.

Rilievo fotogrammetrico digitale con fotocamera terrestre

Si sperimenta l'applicazione della fotogrammetria digitale con fotocamera terrestre per eseguire il rilievo di un tratto murario prima e dopo un intervento di sicurezza. Di seguito, fornisco un'analisi delle tecnologie e dei passaggi coinvolti:

1. Fotogrammetria digitale con SfM (*Structure from Motion*):

Nel contesto descritto, l'uso della fotogrammetria digitale con SfM è stato utile per eseguire rilievi speditivi di stratigrafie terrestri o murarie. Questo metodo ha

permesso di ottenere rappresentazioni dettagliate della struttura, facilitando l'analisi e la pianificazione dell'intervento.

2. Posizionamento dei target di riferimento con GPS:

Prima di eseguire il rilievo, sono stati posizionati quattro target di riferimento nei pressi della struttura, battuti con il GPS. Questo ha contribuito a migliorare la precisione del rilievo, fornendo punti di riferimento noti.

3. Acquisizione di immagini con obiettivo da 24 mm:

Per il rilievo, sono state acquisite 32 immagini da varie angolazioni, utilizzando un obiettivo da 24 mm. La scelta dell'obiettivo grandangolare ha influito positivamente sulla qualità e sulla risoluzione delle immagini acquisite.

4. Elaborazione con Agisoft Metashape:

Dopo l'acquisizione delle immagini, è stata eseguita una rapida elaborazione dei dati utilizzando Agisoft Metashape, che visto l'esiguo numero delle immagini è stato decisamente speditivo.

5. Verifica in cantiere e rimozione della porzione di muro pericolante:

La verifica della buona riuscita del rilievo è avvenuta direttamente in cantiere. Una volta confermata la precisione del lavoro, è stata eseguita la rimozione della porzione di muro pericolante.

6. Ricostruzione della porzione di muro e rilievo post-intervento:

Dopo la rimozione della parte danneggiata, è stata eseguita la ricostruzione del muro. Successivamente, è stato nuovamente eseguito un rilievo post-intervento per valutare l'efficacia dell'operazione. La sovrapposizione di più rilievi ha permesso di ottenere sezioni prima e dopo l'intervento.

Structure from Motion abbinato a fotocamera 360°

La sperimentazione riguarda l'utilizzo delle fotocamere sferiche, in particolare la camera Panono 360, abbinato alle tecniche di fotogrammetria digitale con SfM, che rappresenta ancora un elemento di novità.

1. Fotocamera Panono 360:

La Panono 360 è una fotocamera sferica dotata di 36 fotocamere distribuite uniformemente sulla sua superficie. Questo permette di catturare simultaneamente 36 immagini digitali che vengono fuse in un'unica immagine sferica di alta qualità. La possibilità di controllare la fotocamera a distanza facilita l'acquisizione di immagini in ambienti difficili da raggiungere, contribuendo alla flessibilità e alla praticità nell'uso.

2. Tecniche SfM (*Structure from Motion*) con immagini sferiche:

Le tecniche SfM possono essere utilizzate per generare modelli tridimensionali anche a partire da immagini sferiche. Questo metodo consente di ottenere rapidamente un rilievo dettagliato di ambienti complessi. La capacità di elaborare immagini provenienti da diverse fotocamere sferiche consente una vasta applicazione in ambienti piccoli e intricati, dove altre tecniche come la fotogrammetria piana o il laser scanner potrebbero richiedere più stazioni di presa.

3. Riferimento metrico esterno:

Come nelle tecniche tradizionali di fotogrammetria, anche l'uso di fotocamere sferiche richiede un riferimento metrico esterno per garantire la precisione delle misurazioni. Questo è fondamentale per ottenere risultati accurati nel modello tridimensionale.

4. Elaborazione delle immagini:

Dopo l'acquisizione delle immagini, il processo di elaborazione è facilitato dall'utilizzo di software SfM come Agisoft Metashape. La Panono 360 consente di esportare singole immagini o immagini sferiche, facilitando la gestione e l'elaborazione dei dati.

5. Applicazioni pratiche:

Nel caso specifico descritto nell'ambiente I, sono state utilizzate solo 4 immagini sferiche per ottenere una nuvola di punti con oltre un milione di vertici e un modello 3D texturizzato con effetto fotorealistico. Questo dimostra l'efficienza e la velocità di acquisizione di dati offerte dalla tecnologia.

6. Divulgazione e valorizzazione:

In passato, la fotogrammetria sferica è stata utilizzata principalmente per la creazione di panorami e immagini a 360° per scopi di divulgazione e valorizzazione. Tuttavia, l'uso di strumenti come la Panono 360 dimostra che questa tecnologia può essere applicata anche per scopi documentativi e di rilievo. L'uso di fotocamere sferiche e tecniche SfM offre un approccio rapido, flessibile e dettagliato al rilievo tridimensionale, con applicazioni pratiche in vari contesti, inclusi quelli difficili da raggiungere o complessi.

Rilievo con ZScan

L'analisi tecnica del lavoro descritto evidenzia l'utilizzo del sistema di misurazione ZScan per il rilievo e la documentazione dettagliata delle opere murarie soggette a interventi di restauro. Di seguito sono analizzati i principali aspetti tecnici e metodologie impiegate:

1. La scelta del sistema di misurazione ZScan:

ZScan è un sistema di misurazione che si presta al rilievo di elevati murari inquadrabili frontalmente senza particolari ostruzioni visive. Questo sistema sembra essere una scelta appropriata per l'ambito specifico in cui sono coinvolti elevati murari che delimitano prevalentemente ambienti quadrangolari.

2. Applicazione negli ambienti specifici:

ZScan è stato particolarmente utile negli ambienti I, VI, VII, XIII, XXXI, delimitati sul lato ovest dalla USM 30, soggetta a un importante intervento di restauro. L'applicazione specifica nei contesti con caratteristiche particolari

evidenzia la flessibilità e l'efficacia del sistema nelle situazioni specifiche di rilievo.

3. Caratteristiche dell'opera muraria:

La USM 30, lunga 22,36 metri con uno spessore murario compreso tra 0,69 e 0,78 metri, segue l'andamento della collina. La muratura ha un'altezza residua variabile da 1,64 metri a 0,22 metri nei diversi ambienti. La peculiarità della muratura, con l'appoggio su una roccia opportunamente tagliata, richiede la progettazione di un restauro poco invasivo.

4. Intervento di restauro e indagine stratigrafica:

L'opera muraria è stata interessata da crolli, richiedendo un intervento di restauro che ha incluso la messa in sicurezza con l'utilizzo di reti metalliche, pannelli da armatura e tiranti. L'indagine stratigrafica è stata possibile solo dopo la messa in sicurezza strutturale.

5. Documentazione dettagliata:

Prima dello smontaggio, è stata eseguita la numerazione delle singole pietre e il rilievo dettagliato con 3D laser scanner e ZScan. Questa documentazione approfondita ha garantito la massima precisione e qualità dell'immagine, fornendo un termine di paragone sull'effettiva qualità del rilievo.

6. Elaborazione delle immagini e stampa di ortofoto:

Le immagini catturate sono state elaborate e utilizzate per la stampa di ortofoto della superficie. Ciò ha permesso lo smontaggio sicuro della muratura e il riposizionamento delle lastre nella loro posizione originaria, con un consolidamento significativo del sacco del paramento.

7. Restituzione delle sezioni verticali dopo il restauro:

Il rilievo eseguito dopo l'intervento di restauro mostra la restituzione della verticalità originaria delle pareti, evidenziando il successo dell'operazione di consolidamento e restauro. L'applicazione combinata di ZScan, laser scanner e

l'elaborazione accurata delle immagini ha consentito una documentazione completa e precisa dello stato di fatto della muratura, facilitando un intervento di restauro efficace e sicuro. La restituzione delle sezioni evidenzia il successo dell'operazione.

Rilievo 3D scanner

La sperimentazione consiste nell'utilizzo di un 3D scanner terrestre per la documentazione iniziale dell'area archeologica. Di seguito sono analizzati i principali aspetti tecnici e metodologie impiegate:

1. Documentazione iniziale con 3D scanner terrestre:

Per ottenere una nuvola di punti di tutta l'area sono state utilizzate 15 stazioni di presa e altrettante scansioni. Le impostazioni dello strumento hanno permesso una densità di punti di circa 3 mm a 10 metri di distanza da ogni stazione, garantendo un rilevamento dettagliato dell'ambiente.

2. Processi di filtraggio e semplificazione:

La grande quantità di dati acquisiti (circa 500 milioni di punti) ha richiesto processi di filtraggio e semplificazione per rendere più gestibile la nuvola di punti. Questa fase è cruciale per ottimizzare il successivo processo di elaborazione.

3. Utilizzo del 3D laser scanner alla fine dello scavo:

Il 3D laser scanner è stato impiegato nuovamente alla fine dello scavo per ottenere un rilievo finale dettagliato di tutti i singoli ambienti. Sono state eseguite 125 scansioni, con stazioni sia all'interno che all'esterno degli ambienti, garantendo una copertura completa e dettagliata.

4. Eliminazione delle stazioni di collegamento:

Le stazioni di collegamento sono state eliminate durante la fase di elaborazione per ridurre la complessità della nuvola di punti, rendendola più gestibile. Questa

scelta strategica permette di concentrarsi sui dettagli rilevanti senza appesantire l'insieme di dati.

5. Integrazione di diverse tecnologie di rilevamento:

Il modello ottenuto con il 3D scanner è stato utilizzato come base di lavoro per integrare i risultati ottenuti con altre tecnologie, come la fotogrammetria digitale, sia area che terrestre. Questo approccio consente di sfruttare le specificità di ciascuna tecnologia per ottenere risultati più completi e dettagliati.

6. Orientamento di modelli e dati spaziali:

Sulla nuvola di punti finale sono stati orientati tutti i modelli ottenuti, comprese le elaborazioni di fotogrammetria digitale, piante, sezioni, prospetti e i dati spaziali dei punti GPS. Questa integrazione permette di avere un quadro completo e coerente di tutte le informazioni raccolte.

7. Utilizzo del modello come base di lavoro:

Il modello ottenuto con il 3D scanner può essere utilizzato come base di lavoro per le successive elaborazioni di piante, sezioni e altre rappresentazioni. Questo "contenitore" unificato semplifica il processo di analisi e studio del sito archeologico. L'integrazione di diverse tecnologie di rilevamento, l'ottimizzazione della nuvola di punti e l'uso strategico del 3D scanner come base di lavoro hanno contribuito a una documentazione dettagliata e coerente dell'area archeologica, facilitando la successiva analisi e interpretazione dei dati raccolti.

9.6. L'utilizzo di 3D scanner, ZScan, SfM per la documentazione di otto domus de janas decorate

Il caso di studio tratta delle sperimentazioni del rilievo tridimensionale nell'ambito dell'inclusione di una serie di siti archeologici della Sardegna nella Lista del Patrimonio mondiale UNESCO. Si evidenzia il ruolo svolto nella documentazione grafica di diverse tipologie di siti, in particolare le domus de janas, gli ipogei funerari realizzati nel corso del Neolitico ed Eneolitico sardo. Queste sepolture, caratterizzate da complessi schemi planimetrici e decorazioni, sono state oggetto di rilievi tridimensionali utilizzando tecniche avanzate come il laser scanner 3D, lo ZScan e Structure from Motion. I rilievi sono spesso avvenuti in ambienti poco luminosi e spazi ristretti. L'obiettivo è comprendere quali tecniche siano più efficaci per il rilievo di queste tombe e se consentano una documentazione soddisfacente delle decorazioni. Vengono descritte le operazioni di rilievo eseguite su otto domus de janas con caratteristiche morfologiche e luminosità differenti.

1. Metodologia di rilievo:

Si identificano tre approcci tecnici differenti: il 3D laser scanner a differenza di fase, la fotogrammetria digitale SfM, lo ZScan. Non si tratta di un confronto tra le tre tecniche di documentazione ma di uno studio finalizzato all'integrazione dei modelli ottenuti. L'obiettivo principale è quello di ottenere una rappresentazione volumetrica sotto forma di nuvola di punti (da 3D scanner), un modello texturizzato degli ambienti principali (da SfM), rilievi dettagliati dei motivi decorativi più rappresentativi (ZScan).

2. Strumenti e software utilizzati:

Il software Faro Scene è stato utilizzato per l'allineamento, la colorazione, il filtraggio delle nuvole di punti provenienti da 3D scanner; queste sono state esportate in formato .rcp e gestite prima su Autodesk ReCap e in seguito su Autodesk AutoCAD, per l'elaborazione di piante e sezioni. Agisoft Metashape è stato utilizzato per l'allineamento delle immagini degli ambienti principali,

con l'ottenimento di una nuvola di punti densa (orientata e scalata sul rilievo 3D scanner con l'utilizzo *dell'open source* CloudCompare), e una *mesh* successivamente texturizzata. Anche i modelli ottenuti con ZScan sono stati orientati e esportati per analisi più approfondite dei dettagli.

3. Punti di forza:

Il 3D scanner si è rivelato fondamentale per velocizzare le operazioni di acquisizione delle volumetrie di tutti gli ambienti, grazie alle sue dimensioni e al peso ridotto, utilizzato spesso senza treppiede e direttamente a livello del pavimento. La fotogrammetria SfM ha consentito di ottenere, soprattutto negli ambienti principali, una qualità dell'immagine molto elevata, con uno straordinario effetto fotorealistico. Lo ZScan ha consentito di rilevare con grande precisione, sub-millimetrica, i dettagli decorativi e architettonici.

4. Tempistiche e complessità operativa:

Ogni strumento è stato utilizzato cercando di ottimizzare al meglio le sue caratteristiche. Il 3D scanner è risultato veloce, preciso e particolarmente adatto al rilievo architettonico e volumetrico di tutte le sepolture, anche negli ambienti di ridotte dimensioni. La fotogrammetria ha permesso di ottenere i migliori risultati negli ambienti ben illuminati e spaziosi, che consentivano di avere libertà di movimento. Lo ZScan si è rivelato fondamentale nel rilievo dei dettagli architettonici in cui le singole triplette erano in grado di inquadrare da distanze ottimali la parete.

5. Precisione e riferimenti metrici:

Il 3D scanner ha necessitato del posizionamento di pochissimi punti di riferimento, piazzati (sotto forma di *markers* o piccole sfere in polistirolo, tutte delle stesse dimensioni e di colore bianco per aumentarne la riflettività) soltanto dove necessario e nei punti di passaggio tra interno ed esterno o tra i vari ambienti. Gli stessi *markers* sono stati utilizzati per allineare il rilievo SfM e ZScan sulla nuvola di punti, che ha costituito il riferimento metrico di base, evitando di eseguire misurazioni topografiche in ambienti poco adatti.

6. Conclusioni:

La fusione delle tre tecniche di rilievo ha consentito di ottenere dei dati metrici completi e precisi, con una elevata qualità dei modelli e dell'immagine, tanto da poterli utilizzare sia per scopi scientifici che per finalità di carattere divulgativo. Il caso di studio dimostra come oramai non esista una tecnica di rilievo archeologico assoluta, ma come la scelta debba essere fatta con attenzione valutando i singoli casi.

9.7. L'utilizzo di WebGIS, telerilevamento, fotografia e rilievo tridimensionale applicato alla ricerca di recinti e circoli megalitici

Il caso di studio fornisce un dettagliato resoconto delle metodologie e degli strumenti impiegati nello studio e nella ricerca delle aree megalitiche. La ricerca si basa su un approccio multidisciplinare che per l'individuazione delle aree include telerilevamento, ricognizione sul campo, segnalazioni e consultazione del materiale cartografico. L'uso di foto aeree e satellitari tramite piattaforme WebGIS, come Google Maps e Bing Maps, ha avuto un ruolo fondamentale nell'individuazione dei siti archeologici. L'obiettivo è trovare circoli megalitici nelle aree campione indagate. Le macroaree si trovano nella Sardegna centro-meridionale e settentrionale, con particolare attenzione alle zone di altopiano e alle zone collinose, ambienti frequentati dai costruttori di megaliti. Sono stati impiegati diversi strumenti e risorse, tra cui software GIS come Autodesk Civil 3D per l'elaborazione delle carte, piattaforme WebGIS come Google Maps, Google Earth Pro, Bing Maps, e il Geoportale Nazionale per l'analisi delle immagini satellitari e cartografiche. Tutti i siti individuati tramite telerilevamento sono stati verificati sul campo per confermarne l'autenticità e ottenere dati aggiuntivi sullo stato di conservazione, l'uso del suolo e altri elementi. Sono state utilizzate fotocamere reflex e 3D laser scanner per documentare dettagliatamente i siti archeologici, ottenendo nuvole di punti con informazioni sulla forma e le dimensioni dei megaliti. I dati acquisiti sono stati elaborati con software specializzati come Autodesk Civil 3D per la l'elaborazione di tavole di rilievo e analisi GIS. Sono stati esportati Shapefile contenenti informazioni geografiche e cronologiche sui siti archeologici, e i dati sono stati proiettati su mappe *raster* e vettoriali per l'analisi spaziale. L'analisi dei dati ha permesso di ottenere i risultati di seguito esposti.

Ubicazione

Le caratteristiche ubicative dei siti sembrano confermare quanto accennato in precedenza: la scelta delle zone da destinare alla costruzione di aree megalitiche

non era casuale, ma avveniva in siti localizzati possibilmente su altopiano o vaste aree collinari, che permettevano di avere sia il controllo che la visibilità sulle aree circostanti e sulle principali vie di comunicazione, anche quelle fluviali (CICILLONI 2021). Le caratteristiche costruttive dei circoli megalitici, soprattutto nel caso di raggruppamenti come Tacuara a Nurri e Ausadù a Ghilarza, richiedevano la scelta di un territorio pianeggiante anche per esigenze pratiche. I siti che più ricordano morfologicamente l'area di Tacuara (molto vicina ai margini dell'altopiano) sono anche quelli meno distanti (tra quelli noti alla bibliografia si ricordano, in particolare, Is Cirquittus di Laconi, sul meno imponente pianoro di Cuccuru Mandareddu, S'Incorradroxiu e Pranu Ilixi di Silius, che offrono una vista spettacolare sull'altopiano di Pranu Mutteddu e sulla valle del Rio Schirru). L'area di Su Forreddu a Gesico ha morfologia collinare; sempre su altopiano, ma distanti dal margine, le aree di Su Sassu a Ploaghe e Sa Ortija a Chiaramonti; ai piedi di alture di modesta entità si trova Su Corrazzu de is Pillonis a Guspini (l'unico sito in pianura), sopra un'altura, ma sempre su altopiano, Ausadù di Ghilarza; singolare la posizione di Sa Lendinosa di Orotelli, su un area pianeggiante che si estende tra la riva destra del Tirso e un costone tufaceo che sovrasta il monumento ad occidente. La scelta del sito non poteva prescindere dall'esigenza pratica dell'approvvigionamento della materia prima; quindi, le aree megalitiche sorgevano preferibilmente vicino alle stesse aree di cava: sugli altopiani rocciosi, le alture e le colline marnose non dovette essere difficoltoso reperire la materia prima. Ciò appare evidente a Tacuara (i margini dell'altopiano presentano conformazioni tali da consentire l'estrazione del materiale, inoltre l'altopiano fu interessato dalla presenza di piccole cave di basalto fino al secolo scorso), Su Corrazzu de Is Pillonis di Guspini (l'altura di Bruncu s'Orcu offrì la materia prima anche per la costruzione dell'omonimo nuraghe), Sa Lendinosa di Orotelli (qui i costruttori utilizzarono il tufo, roccia più tenera del basalto); nelle aree di Sa Ortija di Chiaramonti, Su Sassu di Ploaghe e Ausadù di Ghilarza la presenza di massi affioranti e probabilmente erratici risulta pressoché evidente. La breve distanza dai corsi d'acqua è un'altra caratteristica delle aree megalitiche prese in esame: la distanza media dal fiume, spesso stagionale, più vicino è di 185 metri, con

una forbice che varia dai 50 ai 400 metri. Il sito di Tacuara a Nurri si trova a soli 300 metri dal Rio Bau de Perda Ollastu, e non più lontane sono due importanti sorgenti; Sa Ortija di Chiaramonti è a 400 metri dal Riu Badu Ebbas ed in prossimità di altri tre fiumi stagionali, mentre Su Sassu di Ploaghe è a soli 240 metri dal Riu Pentuma; Sa Lendinosa di Orotelli dista appena 80 metri dalla sponda destra del fiume Tirso, dal quale invece dista 3 chilometri il sito di Ausadù a Ghilarza, che però è molto più vicino ai suoi affluenti, in particolare al Rio Marcu (100 metri); stesso dicasi di Su Forreddu di Gesico (100 metri dal Riu Mannu), Su Corrazzu de is Pillonis di Guspini (300 metri dal Rio Pratzidus e dai suoi affluenti). L'altitudine dei siti è piuttosto varia, con una quota media di 321 metri: sotto i 200 metri troviamo Su Corrazzu de is Pillonis (37 metri s.l.m.) e Sa Lendinosa (179 metri s.l.m.); sopra i 500 metri di quota solo tre siti: Tacuara (544 metri s.l.m.).

Caratteristiche planimetriche e costruttive

L'analisi tipologica dei circoli megalitici si basa, soprattutto, sulla disposizione planimetrica degli ortostati, con varianti dovute alla forma del monumento (circolare o ellittica), alla disposizione in maniera continua o discontinua degli ortostati o a caratteristiche particolari, come la presenza di un ingresso monumentale. Dato il numero esiguo dei monumenti indagati, la classificazione proposta è provvisoria, in attesa dei futuri sviluppi della ricerca. Gran parte dei monumenti hanno forma circolare o sub-ellissoidale; la disposizione degli ortostati può essere continua o discontinua. L'orientamento dell'ingresso è constatabile in pochi casi: a Tacuara i circoli A e B si aprono a sud-est (probabilmente anche su Corrazzu de Is Pillonis di Guspini), Su Sassu di Ploaghe a S. Le strutture sono, solitamente, isolate: nei soli casi di Tacuara a Nurri e Ausadù a Ghilarza (rispettivamente con 7 e 3 circoli) si hanno siti con raggruppamenti di monumenti; a Tacuara della medesima tipologia (continui, talvolta con ingresso monumentale), ad Ausadù di due tipologie (continui e discontinui). Il numero degli ortostati è fortemente variabile: da poche decine fino ai 106 di Sa Ortija a Chiaramonti; nei circoli costruiti con pochi ortostati questi hanno solitamente dimensioni importanti, in quelli invece con decine di

massi si riscontrano dimensioni che variano da poche decine di centimetri fino ad oltre 2 metri. La forma dei blocchi è spesso rotondeggiante o globulare, altre volte allungata, tanto da avere l'aspetto di menhir aniconico. Accade spesso che i cerchi si adattino alla conformazione della roccia affiorante, che diventa parte della struttura, con una integrazione tra l'opera dell'uomo e la morfologia del terreno naturale, tale da giustificare la presenza di una sorta di tecnica di costruzione mista. Il materiale utilizzato è di norma reperito in loco, tant'è che i monumenti sorgono in aree che consentono la facile estrazione e trasporto dei macigni (situazione particolarmente evidente ad Ausadù e Sa Ortija, dove i blocchi dovevano essere trasportati per rotolamento). Si hanno così cerchi in basalto (il materiale più utilizzato), tufo, calcare, scisto, granito, marna. In un solo sito si ha la certezza di un ingresso monumentale (Su Sassu a Ploaghe, mentre non è certo per Tacuara A). Le dimensioni dei cerchi sono variabili da pochi metri a diverse decine; le immagini di repertorio e il *cropmark* ancora evidente sul suolo, permettono di ipotizzare un diametro di circa 46 m per Su Forreddu di Gesico, facendone così il monumento circolare più esteso tra quelli censiti. Sa Ortija, che ha forma ellissoidale, raggiunge i 37,52 m. Difficile fare una seria proposta di classificazione allo stato attuale delle ricerche, data l'esiguità del numero di monumenti indagati, le variabili da prendere in considerazione e l'impossibilità, talvolta, di eseguire dei rilievi completi. Tale classificazione andrebbe comunque fatta su base prevalentemente planimetrica, considerando la forma (circolare, ellittica, semi-ellittica e irregolare quelle riscontrate), la disposizione degli ortostati (in particolare continua, quindi senza spazi tra i blocchi litici, discontinua o mista), la presenza di menhir o altari all'interno del cerchio, la tipologia dell'ingresso (semplice, monumentale, non rilevabile se discontinuo).

Inquadramento cronologico

Tra i monumenti megalitici sardi (dolmen, *alleé couvert*, menhir e allineamenti, cerchi funerari) i cerchi megalitici sono, senza dubbio, quelli meno indagati. Ad oggi, infatti, sono pochi i monumenti segnalati in bibliografia e ancor meno quelli oggetto di un'indagine archeologica. Tra i monumenti scavati che hanno

fornito dati cronologici affidabili si ricordano il circolo di Monte Baranta ad Olmedo (MORAVETTI 2000A, 2004) (l'indagine parziale dell' "area sacra" rientra in quella, più estesa, della fortificazione ciclopica) e Sa Figù di Ittiri (MELIS 2001, 2004), scavato nell'ambito delle ricerche volte ad approfondire le conoscenze sulla vicina necropoli ipogeica; il circolo di Is Cirquittus a Laconi (ATZENI 2004) non è stato scavato, ma Enrico Atzeni ha indagato una struttura sub-quadrangolare con probabile funzione cerimoniale poco distante; oggetto d'indagine è stato il anche *cromlech* calendariale di Sa Sedda de Biriai di Oliena (CASTALDI 1999, 2001). Nonostante l'esiguità dei dati sulla cultura materiale proveniente da indagini stratigrafiche all'interno dei circoli megalitici sardi, siamo in grado di formulare delle ipotesi, che si basano sia sul dato puramente archeologico che sui confronti tipologici con costruzioni similari nel resto dell'Europa e del Mediterraneo. L'area sacra di Monte Baranta ad Olmedo è inserita in un complesso che risale all'Eneolitico sardo, in particolare all'orizzonte culturale di Monte Claro. La struttura, inserita prima dello scavo in un reticolo di quadrati 2x2, è stata indagata solo parzialmente (5 quadrati): vi sono stati rinvenuti sporadici frammenti ceramici Monte Claro, schegge di selce, ed un pestello litico. Secondo l'autore l'area non è mai stata utilizzata. Più approfondite le indagini nel circolo megalitico di Sa Figù di Ittiri, che hanno interessato per intero l'area circoscritta dai megaliti e parzialmente quella esterna, con due saggi in corrispondenza dell'ingresso a Sud e di una piccola apertura ad Ovest. L'analisi della stratigrafia evidenzia fasi di frequentazione differenti del sito: in un primo momento, quello che a noi interessa, si ha la realizzazione della struttura megalitica, provvista di un ampio ingresso a Sud, a cui seguono fasi di riutilizzo come abitazione (con importanti modifiche strutturali), fino al definitivo abbandono. Il primo impianto risale, dallo studio degli esigui frammenti ceramici, al pieno Eneolitico sardo, caratterizzato dalla Cultura di Monte Claro; gli strati depositatisi successivamente, riferibili all'età del Bronzo e decisamente più ricchi di materiali, denotano un uso di tipo abitativo per questa fase. Anche gli scavi svoltisi dal 1979 al 1988 nel sito di Sa Sedda de Biriai ad Oliena, condotti sul campo dall'archeologa Editta Castaldi, che oltre all'abitato hanno restituito i resti di un santuario e di un *cromlech* di

difficile interpretazione, hanno restituito materiali riferibili al Monte Claro. Nel caso, invece, di Is Cirquittus di Laconi, Enrico Atzeni ha segnalato lo scavo di una struttura sub-rettangolare con probabile valenza culturale, che ha restituito materiali di cultura Ozieri. Al momento l'associazione tra tipologia dei monumenti e materiali databili rinvenuti è molto difficile: si hanno, comunque, due circoli megalitici di forma circolare, uno continuo (Monte Baranta) ed uno probabilmente continuo (Sa Figu), con materiali Monte Claro negli strati più antichi; la struttura associata al circolo discontinuo ed ellissoidale di Cirquittus ha restituito, invece materiali riferibili, secondo l'autore, al Neolitico Recente (Ozieri). Gli elementi culturali presenti in molti siti (Tacuara, Su Forreddu, Sa Ortija), o nelle vicinanze, in particolare le cospelle, tendono a rafforzare l'accostamento tra i circoli e l'Eneolitico. L'inquadramento cronologico incontra svariate problematiche anche in ambito extra-insulare, dovute soprattutto alla carenza del dato archeologico, al lungo utilizzo o riutilizzo delle strutture, al manifestarsi del fenomeno in maniera non omogenea ed in più parti del mondo, con la difficoltà di individuare un vero e proprio focolaio. Mancano, ad esclusione delle isole britanniche e della Bretagna, dei lavori di sintesi che analizzano il fenomeno dei circoli megalitici in regioni ben definite. La costruzione dei circoli può farsi risalire almeno fino al IV millennio a.C., con fenomeni attardati che si manifestano fino all'età del Ferro avanzata (V secolo a.C.) e un probabile uso in età storica. Secondo Aubrey Burl, almeno per quanto riguarda le isole britanniche, la loro costruzione avvenne tra il 3.500 ed il 1.200 a.C, un periodo in cui 90 generazioni hanno visto il manifestarsi di questo straordinario fenomeno (BURL-MILLIGAN 1999). Egli individua tre fasi: una antica, nel Tardo Neolitico (3.500 – 2.500 a.C.), quando i metalli erano sconosciuti alle comunità della Gran Bretagna e dell'Irlanda, con la costruzione di grandi circoli, fino 100 m di diametro; una intermedia, nell'età del Bronzo Iniziale (2.500 – 2.000 a.C.), con la costruzione dei circoli più perfetti, talvolta di dimensioni modeste, con architetture che variano in base alla regione e presenza di siti con più di una struttura; una fase finale nella tarda età del Bronzo (2.000 – 1.200 a.C.), con un misto tra i due periodi precedenti, la realizzazione di circoli che denotano confusione e sbagli nel tentativo di imitare gli avi, la

presenza anche di piccoli circoli ad uso di gruppi familiari. I circoli megalitici vengono poi abbandonati fino ad andare in decadimento. L'archeologo francese Jacques Briard sembra essere, a grandi linee, in accordo con Aubrey Burl sull'inquadramento cronologico, datando i circoli megalitici più antichi delle isole britanniche alla fine del IV millennio a.C., fino al raggiungimento dell'apogeo di Stonehenge nel Bronzo Antico (1.800 a.C.) ed un successivo decadimento. In Bretagna il sito di Er-Lannic ha restituito materiali databili al Neolitico (3.500 a.C.). Anche la penisola iberica sembra essere stata interessata sin dai tempi più remoti dal fenomeno dei circoli megalitici, a partire dall'area pirenaica per giungere fino al Portogallo, con monumenti costruiti in un periodo piuttosto lungo, dal Neolitico all'età del Ferro (ALTUNA-ARESO 1977).

Per quel che riguarda i circoli megalitici sardi, si può azzardare una periodizzazione suddivisa in tre fasi, che riprende, quindi, quella di Burl. Ad una prima fase si può ricondurre il solo circolo megalitico di Is Cirquittus di Laconi, di grandi dimensioni, con forma semi-ellissoidale ed una disposizione dei blocchi discontinua. I materiali, non pubblicati, della vicina struttura scavata da Atzeni sono riferibili al Neolitico Finale (Ozieri). A questa fase arcaica ne sarebbe seguita una seconda, sviluppatasi all'interno della cultura Eneolitica di Monte Claro, che ha visto l'esplosione del fenomeno con la realizzazione di circoli di varie tipologie (continui e discontinui nella disposizione, prevalentemente circolari nella forma), anche in raggruppamenti (Tacuara a Nurri e Ausadù a Ghilarza). Ad una terza fase finale, riferibile forse al Bronzo Antico, si potrebbe ricondurre il solo circolo di Su Sassu: di dimensioni modeste, più curato nella forma perfettamente circolare, con ingresso monumentale e planimetria complessa per la presenza di una sorta di vestibolo, possiede una cura nella progettazione che sembra già proiettarsi verso le successive manifestazioni dell'architettura isolana.

Funzione e significato dei circoli megalitici

Sulla funzione dei circoli megalitici permangono molti dubbi. Se risulta ormai chiara la funzione dei circoli funerari studiati negli ultimi decenni in varie parti dell'isola, soprattutto per la presenza di un tumulo o di una camera/cista litica

al loro interno, che li riconduce ad un orizzonte di continuità con l'ipogeismo funerario tipico nel Neolitico Medio e Finale, altrettanto non si può dire per i circoli megalitici oggetto di questa indagine. Le posizioni degli studiosi restano comunque abbastanza ferme su due possibili aspetti: quello culturale, calendariale o entrambi.

Il cerchio rappresenta un elemento simbolico per molte comunità, siano esse civili o religiose, anche in epoca contemporanea. Lo era ancor più per le popolazioni preistoriche, che all'interno dei cerchi (di menhir, lastre o semplici fossati) svolgevano attività legate all'ambito funerario e culturale. I pochi monumenti scavati in Sardegna non ci permettono, allo stato attuale della ricerca, di definire dai dati di scavo quali fossero le azioni o i rituali svolti all'interno di queste particolari strutture, riferibili ad un vasto periodo che, come si è visto, inizia forse nel Neolitico Finale e prosegue con la prima età del Rame (MANUNZA 2008), attraversando tutto il III millennio a.C. e l'età del Bronzo. Nei siti di Pranu Mutteddu a Goni e Li Muri ad Arzachena troviamo aree delimitate da megaliti anche all'interno delle necropoli. Queste strutture, come gli allineamenti di menhir, stanno ad indicare la sacralità di un luogo per le comunità che le hanno erette, nonché il luogo stesso in cui si svolgevano determinati rituali. La nascita del circolo megalitico potrebbe essere avvenuta proprio all'interno delle necropoli, per necessità legate al bisogno di avere spazi maggiori per l'esecuzione del rituale funebre (BURL 1987). Lo studio dei celebri monumenti dell'Europa continentale (Stonehenge, Avebury, Er-Lannic, etc.) ha portato a supporre un utilizzo dei circoli legato al culto degli astri, con una chiara funzione calendariale che finiva per riflettersi nell'attività agricola delle popolazioni neolitiche, che per prime eressero i monumenti megalitici. Il culto sembra essere infatti legato a quello della dea madre, la terra nella quale i megaliti vengono inseriti, e le divinità celesti, che riflettono la loro azione sui cicli dell'agricoltura. I luoghi di culto, però, non vengono abbandonati con l'inizio dell'età dei metalli, bensì il megalitismo prosegue la sua diffusione e gli scavi archeologici mostrano un utilizzo che perdura in pieno almeno fino all'età del Bronzo (si segnalano fenomeni di attardamento perfino nella successiva età del Ferro e in età storica).

Oltre alla funzione calendariale la presenza dei circoli all'interno delle necropoli fa pensare ad ambienti o aree sacre in cui si svolgevano quei riti che precedevano la sepoltura, tra i quali la scarnificazione o l'essiccazione dei cadaveri, non comprovabile in Sardegna (LILLIU 2003).

La scelta del sito nel quale erigere un circolo megalitico doveva essere cosa molto importante, che coinvolgeva i membri più rappresentativi delle comunità ed era strettamente legata al controllo del territorio; infatti gran parte dei siti individuati si trovano in aree che hanno grande visibilità sui territori circostanti, quindi sulle sommità delle colline o su altopiani e piccoli pianori; queste caratteristiche fanno del circolo megalitico, e di tutti i megaliti in genere, un demarcatore del territorio, con una funzione di tipo politico-economico legata ai possedimenti di un gruppo umano (CICILLONI 2012). Le dimensioni dei circoli, che variano da pochi metri di diametro fino a qualche decina, e la presenza nei siti segnalati di un numero che varia da una a sette unità, fa supporre che vi fossero siti utilizzati da piccoli gruppi familiari ed altri, di maggiore importanza su scala territoriale, nei quali i vari clan potevano riunirsi.

I circoli megalitici, in sintesi, sembrano avere una triplice funzione: religiosa, politica e commerciale. Anche un eventuale legame con l'osservazione degli astri e la misura del tempo non si discosterebbe da questo utilizzo.

Il gran numero di megaliti presenti nel nord della Francia (in particolare in Bretagna) e la loro monumentalità, hanno fatto supporre che in questa regione si potesse individuare il focolaio della diffusione del megalitismo, o della "civiltà megalitica". Tale teoria diffusionista afferma che il propagarsi del fenomeno è avvenuto prevalentemente via mare, poiché i monumenti si trovano in località non troppo interne dell'Europa continentale e nelle isole. La presenza di manifestazioni simili in tutto il Mediterraneo o addirittura in Asia e in Africa fa pensare possa trattarsi di un fenomeno sviluppatosi anche in maniera autonoma in più centri.

Resumen Capítulo 9: Análisis de datos, comparaciones, resultados

El capítulo tiene como objetivo analizar críticamente los diferentes enfoques utilizados para obtener los levantamientos tridimensionales descritos anteriormente, destacando sus ventajas, limitaciones y aplicaciones específicas, comparándolos con otros métodos similares citados en la literatura, examinando la precisión, la velocidad de adquisición, la robustez, la capacidad de adaptación a las condiciones ambientales y la versatilidad de uso. El objetivo principal es ofrecer una visión completa y actualizada de las opciones disponibles para guiar la elección de la técnica más adecuada para las necesidades específicas de investigación o aplicativas. A través de una revisión sistemática de las técnicas de levantamiento tridimensional, se pretende contribuir al debate científico y promover una selección consciente de las metodologías según los objetivos establecidos.

El levantamiento de artefactos de cerámica

El primer caso de estudio tiene como objetivo principal obtener una representación detallada de los hallazgos a través de la elaboración de modelos tridimensionales en forma de *mesh*, derivados de nubes de puntos densas, para permitir la extracción de vistas y secciones de los objetos para análisis adicionales. Respecto a las herramientas y *software* utilizados, se empleó el programa *open source* CloudCompare para alinear los modelos obtenidos mediante fotogrametría digital (Agisoft Metashape) y ZScan Micro. Se utilizó AutoCAD para la importación, el diseño y la impresión de las secciones en formato vectorial .dwg. La comparación entre ZScan Micro y *Structure from Motion* (SfM) destacó que, aunque ZScan Micro es muy preciso, requiere más tiempo en comparación con la fotogrametría SfM. Se observaron varias limitaciones de ZScan Micro, como la necesidad de una mayor estabilidad para la colocación en trípode, calibraciones frecuentes y la complejidad logística añadida por los diferentes soportes. La fotogrametría SfM, por otro lado, ofrece una adquisición rápida de imágenes, con un proceso más ágil y menos costoso en términos de equipamiento. En cuanto a los tiempos y la complejidad operativa, se resaltó que ZScan Micro lleva más tiempo debido a las diferentes fases de adquisición y procesamiento involucradas, mientras que la fotogrametría SfM utiliza un solo software. El equipo necesario para el

levantamiento con ZScan Micro es más complejo y menos cómodo de transportar, especialmente al aire libre o en un sitio de construcción. En términos de precisión, ZScan Micro resultó muy preciso e independiente de referencias métricas externas, mientras que la fotogrametría SfM requiere dichas referencias pero puede implementarse con una configuración más sencilla. El análisis de costes mostró que el equipo para ZScan Micro es mucho más caro que una licencia completa de Agisoft Metashape Professional, y la presencia de *software* SfM gratuitos puede reducir aún más los costes. En conclusión, la elección entre ZScan Micro y SfM depende de las necesidades específicas del proyecto, considerando el tamaño de los objetos, la necesidad de microlevamientos y los recursos financieros.

El levantamiento de bronce figurados

El segundo caso de estudio trata sobre el levantamiento de bronce figurados, con el objetivo de enriquecer la oferta cultural del territorio mediante la exposición de copias fieles. Las tecnologías utilizadas incluyen ZScan Micro, fotogrametría digital (SfM) y escáner 3D de luz estructurada. ZScan Micro resultó ser más lento en la adquisición y requiere tiempos de procesamiento más largos en comparación con los otros dos métodos. La fotogrametría SfM requiere tiempos de procesamiento similares al escáner 3D. Este último es el más rápido en la adquisición y ofrece un alineamiento automático o semiautomático de los escaneos. La complejidad de las formas de los objetos afecta el tiempo de levantamiento y procesamiento. Las superficies de los bronce pueden tener brillo, lo que dificulta el levantamiento. El escáner 3D óptico produjo resultados superiores a SfM y a ZScan Micro, especialmente en presencia de superficies brillantes. Se recomienda el uso de escáneres 3D de alta calidad, a pesar del alto coste, para garantizar resultados apreciables, especialmente considerando la singularidad de los hallazgos y la finalidad de creación de prototipos de resina con impresoras 3D. Los escaneos obtenidos podrían ser utilizados para crear prototipos de nuevas copias destinadas a exposiciones futuras o recorridos táctiles, representando un documento valioso del estado de conservación de los hallazgos. Los microlevamientos también pueden ser utilizados para analizar el nivel de calidad de las realizaciones.

El levantamiento de una sepultura calcolítica

Se continúa con la exposición de los resultados derivados del proceso de levantamiento de la sepultura de Corti Beccia, utilizando diferentes técnicas como el escáner 3D, el levantamiento con ZScan y el levantamiento SfM (*Structure from Motion*), con el objetivo de desmontar y volver a montar la sepultura calcolítica. El levantamiento con un escáner 3D terrestre permitió obtener una representación detallada de la tumba, gracias a una resolución de aproximadamente 2 mm para la malla de puntos. Las diferentes estaciones de captura colocadas alrededor y dentro de la sepultura garantizaron una cobertura completa y una amplia superposición de datos. La ausencia de objetivos externos aceleró el proceso de escaneo, reduciendo el tiempo necesario para adquirir los datos en el campo a aproximadamente 90 minutos, con un procesamiento adicional de aproximadamente dos horas. En el levantamiento con ZScan se utilizó una óptica fija de 24 mm que requirió una gestión cuidadosa de la iluminación para garantizar la calidad de las imágenes. A pesar del mayor número de vértices en la nube de puntos en comparación con el escáner 3D, el proceso fue eficiente, con una duración total de aproximadamente 80 minutos para el levantamiento y el procesamiento. La eliminación manual de puntos redundantes fue crucial para optimizar el modelo. El levantamiento SfM permitió una adquisición rápida de datos en el campo en solo 20 minutos, seguido de un procesamiento rápido en aproximadamente 35 minutos. La falta de referencias externas simplificó el proceso, permitiendo el uso de las mismas imágenes adquiridas con ZScan y contribuyendo a reducir el tiempo de procesamiento. El alineamiento de las nubes de puntos provenientes de diferentes fuentes se realizó con cuidado, manteniendo la coherencia espacial entre los diferentes modelos. La buena superposición y precisión de los datos integrados demostraron la eficacia de la metodología en la detección y documentación de detalles arquitectónicos o arqueológicos con precisión y detalle.

El levantamiento de un templo nurágico a megaron

La documentación del templo nurágico a *megaron* de Domu de Orgia, ubicado en Esterzili, se realizó mediante el uso de escáner láser 3D (TOF y diferencia de fase), fotogrametría digital y drones. En primer lugar, se describe el levantamiento previo a la restauración, utilizando un escáner láser 3D TOF, que permitió adquirir

información detallada sobre el estado inicial del monumento. Este proceso requirió una planificación cuidadosa y una distribución efectiva de las actividades para garantizar la completitud y precisión de los datos recopilados. Posteriormente, después de la restauración, se utilizó un escáner láser 3D de fase para documentar los cambios realizados y evaluar la efectividad de las intervenciones. Esto permitió una evaluación precisa del éxito de la restauración y proporcionó datos cruciales para monitorear la evolución a lo largo del tiempo del estado del monumento. Paralelamente, se utilizó la fotogrametría digital con la técnica *Structure from Motion* (SfM) desde drones para generar modelos tridimensionales del templo después de la restauración, ofreciendo una visión global de la estructura y su entorno ambiental. Este enfoque agregó un nivel adicional de detalle a la documentación del monumento, permitiendo una mejor comprensión de las dinámicas arquitectónicas y ambientales. El alineamiento de los modelos obtenidos con esta tecnología con respecto a los modelos provenientes de los levantamientos con escáner láser 3D fue facilitado por el uso de marcadores visibles en la textura, lo que permitió un proceso más eficiente y una mejor consistencia en los resultados. En conclusión, la integración de diferentes tecnologías de levantamiento tridimensional desempeñó un papel fundamental en el éxito de las operaciones de restauración del templo nurágico de Domu de Orgia.

El levantamiento de un asentamiento de la Tardoantigüedad

El levantamiento del asentamiento tardoantiguo de Fusti'e Carca en Tertenia requirió el uso de diversas técnicas, cubriendo un área extensa y compleja dividida en numerosos ambientes. Para abordar las múltiples dificultades del proyecto, se adoptó un enfoque multidisciplinario que integró diversas metodologías de levantamiento. La fase inicial del proyecto involucró el uso de instrumentación DGPS para establecer una red geodésica en toda el área a examinar, seguida del uso de vuelos con drones para adquirir datos fotogramétricos aéreos. Este enfoque permitió obtener modelos 3D y ortofotos detallados, integrando datos de diversas fuentes. Paralelamente, se utilizaron dispositivos de captura esférica como la cámara Panono 360 para documentar rápidamente entornos complejos. Esta tecnología demostró ser efectiva en la generación de modelos tridimensionales en

poco tiempo, contribuyendo a capturar detalles en pisos y techos de los ambientes. Además, el levantamiento detallado de las estructuras murales se realizó utilizando un escáner 3D de fase, mientras que el sistema ZScan se utilizó para capturar altos muros frontales sin obstrucciones visuales significativas. El proyecto también involucró el levantamiento fotogramétrico digital con cámara terrestre, utilizando la técnica SfM, que permitió obtener representaciones detalladas de las estructuras, facilitando el análisis y la planificación de las intervenciones. Finalmente, se realizó la documentación inicial y final del área arqueológica utilizando un escáner 3D terrestre, que proporcionó una nube de puntos detallada y coherente. Este modelo se utilizó luego como base de trabajo para integrar los resultados de otras técnicas de levantamiento y facilitar el análisis e interpretación de los datos recopilados. En resumen, el uso combinado de diversas técnicas avanzadas de levantamiento proporcionó una documentación completa y detallada del asentamiento tardoantiguo, permitiendo una comprensión profunda de sus estructuras y estratigrafías.

La documentación en 3D de las domus de janas decoradas En el estudio se aborda el uso de técnicas avanzadas de levantamiento tridimensional, como el escáner 3D, el ZScan y la fotogrametría digital SfM, para documentar las *domus de janas* decoradas en Cerdeña. Estas técnicas se aplicaron en el contexto de la candidatura de sitios arqueológicos sardos a la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO. A partir de los resultados obtenidos, se comprende cómo los escáneres 3D son fundamentales para la documentación de los datos métricos y las volumetrías, mientras que la instrumentación fotogramétrica permite obtener altos niveles de calidad de las imágenes.

La investigación en las macroáreas

Se presenta un informe sobre las metodologías y herramientas utilizadas en el estudio e investigación de las áreas megalíticas en Cerdeña, utilizando un enfoque multidisciplinario que incluye *remote sensing*, reconocimiento de campo, informes y consulta de material cartográfico. El uso de fotografías aéreas y satelitales a través de plataformas WebSIG ha desempeñado un papel fundamental en la identificación de los yacimientos arqueológicos, con especial atención a las áreas montañosas y a

las mesetas frecuentadas por los constructores de megalitos. Los datos adquiridos fueron verificados en el campo y documentados detalladamente utilizando cámaras digitales y escáneres láser 3D, obteniendo información sobre la forma y dimensiones de los monumentos. Los resultados fueron procesados con software para la elaboración de tablas de levantamiento y análisis SIG, proyectados en mapas raster y vectoriales para el análisis espacial. El análisis de los datos permitió identificar la ubicación, características planimétricas y constructivas, así como el contexto cronológico de los círculos megalíticos estudiados. Se identificaron tres fases de desarrollo, con una posible asociación entre los monumentos y las fases culturales del Calcolítico sardo. Sin embargo, la función y significado de los círculos megalíticos siguen siendo objeto de debate entre los académicos, con hipótesis que sugieren una posible conexión con prácticas rituales y culturales, incluidas las relacionadas con el culto, la observación de los astros y la medición del tiempo, además de un papel político-económico en el control del territorio.

10. Conclusioni

Il lavoro di ricerca descritto è la sintesi di diciassette anni di sperimentazioni sul campo di diverse tecniche di rilievo e documentazione applicate all'archeologia, in cui sono stati esposti alcuni degli esperimenti più interessanti e completi. Alcune delle tecniche utilizzate in questi anni, non solo quelle descritte, si sono dimostrate valide e competitive, altre sono state invece abbandonate a causa della rapidissima evoluzione tecnologica a cui si assiste o delle difficoltà avute nell'applicarle con successo. Il processo di integrazione tra rilievo tradizionale e rilievo digitale sembra ormai compiuto. Vista la complessità e singolarità dei casi di studio trattati e visto l'utilizzo di strumentazioni specifiche per ogni singolo caso, anche il capitolo conclusivo, così come quello riservato all'analisi dei dati, è stato suddiviso seguendo lo schema utilizzato per le sperimentazioni sul campo.

Il rilievo dei manufatti in ceramica

Il sesto capitolo della tesi presenta una sperimentazione approfondita sull'utilizzo di due diverse tecniche di digitalizzazione per il rilievo dei manufatti in ceramica: la fotogrammetria digitale (*Structure from motion* o SfM) e lo ZScan Micro. Attraverso un'analisi dettagliata, è emerso che entrambi i sistemi offrono vantaggi e limiti specifici. Lo studio ha dimostrato che lo ZScan Micro garantisce una notevole precisione nel rilevamento, paragonabile a quella di uno scanner 3D a luce strutturata, e opera senza la necessità di riferimenti metrici esterni. Tuttavia, presenta limiti legati alla complessità e all'ingombro dell'attrezzatura, oltre a un costo significativo. D'altra parte, il sistema SfM si distingue per la sua rapidità, efficienza e minor costo dell'attrezzatura. Anche se richiede riferimenti metrici esterni, può essere implementato in modo più snello e offre soluzioni software gratuite che riducono ulteriormente i costi complessivi. La scelta tra i due sistemi dipende dalle specifiche esigenze del progetto. Mentre lo ZScan Micro è ideale per progetti che richiedono massima precisione e indipendenza dai riferimenti metrici (come, per l'appunto, la prototipazione finalizzata all'esposizione di copie fedeli degli oggetti), il

sistema SfM rappresenta una soluzione più economica e veloce, adatta a situazioni in cui la rapidità di acquisizione è prioritaria (ad esempio la diffusione dei contenuti *online*). In conclusione, lo studio ha contribuito a una valutazione comparativa approfondita tra due approcci tecnici per il rilievo e la restituzione grafica della ceramica non tornita, offrendo una guida preziosa per la selezione dell'approccio più adatto in base alle esigenze specifiche del progetto. Entrambi gli approcci hanno permesso di raggiungere l'obiettivo di ottenere modelli tridimensionali dettagliati. Sono stati utilizzati diversi strumenti e software, inclusi CloudCompare, Agisoft Metashape e Autodesk AutoCAD, che hanno giocato un ruolo fondamentale nel processo. La scelta del metodo da utilizzare dipende soprattutto dalle esigenze specifiche del progetto, considerando dimensioni degli oggetti, necessità di micro-rilievi e risorse finanziarie disponibili. Altri casi di studio analizzati hanno dimostrato come vi siano enormi differenze tra la realizzazione di modelli digitali e di tavole grafiche da eseguire su ceramiche tornite e non tornite. Queste differenze pesano sia sulla scelta degli strumenti da adoperare per la digitalizzazione che dei software da destinare all'elaborazione dei modelli. La tecnica SfM ha dimostrato di avere enormi margini di miglioramento, soprattutto per quanto riguarda il livello di precisione; lo ZScan necessiterebbe, invece, di un aggiornamento del sistema, sia nelle sue componenti hardware che in quelle software. Questo strumento, nonostante l'altissimo livello di precisione raggiungibile, paragonabile a quello dei più moderni 3D scanner a triangolazione ottica, ha forti limitazioni dovute ai costi, alla bassa manovrabilità e alla complessità dei software utilizzati.

Il rilievo dei bronzi figurati

Le conclusioni tratte dal secondo caso di studio evidenziano un approccio mirato al rilievo di reperti mobili, con particolare attenzione ai bronzi provenienti dal tempio a megaron di Domu de Orgia di Esterzili e dal pozzo nuragico di Santu Antinu a Genoni. L'obiettivo primario di questo studio era arricchire l'offerta culturale del territorio attraverso l'esposizione di copie (prototipi) fedeli dei bronzi, consentendo ai visitatori di immergersi nella storia e nell'arte dei reperti originali. Le copie fedeli sono state prodotte utilizzando una stampante 3D a

getto di resina ad altissima precisione, seguite da un processo di colorazione eseguito da restauratori esperti al fine di renderle visivamente identiche agli originali. In questo contesto, sono state adottate tre diverse tecnologie per il rilievo: lo ZScan Micro, la fotogrammetria digitale (SfM) e lo scanner 3D a luce strutturata. L'analisi dei dati ha evidenziato che lo scanner 3D è il metodo di acquisizione più veloce, seguito dalla fotogrammetria digitale e dallo ZScan Micro. Tuttavia, sono emerse differenze significative nella qualità e nella complessità dei dati raccolti. Lo scanner 3D a luce strutturata si è dimostrato superiore in termini di precisione e dettaglio, nonostante le difficoltà legate alla lucentezza delle superfici dei bronzi, superate grazie alla possibilità di regolare l'intensità della luce. Al contrario, SfM e ZScan Micro hanno mostrato alcune lacune nel rilevamento, richiedendo interventi di *editing* per compensare le mancanze e non raggiungendo il livello di qualità dello scanner 3D. Considerando l'eccezionalità dei reperti e la necessità di risultati apprezzabili, si raccomanda l'utilizzo di scanner 3D di alta qualità nonostante il costo elevato, al fine di garantire la precisione e l'affidabilità dei dati acquisiti. Inoltre, è importante sottolineare che le caratteristiche morfologiche e superficiali dei bronzi hanno influenzato significativamente il processo di rilevamento: quelli con superfici pulite e lucide hanno richiesto tempi di acquisizione e di elaborazione più lunghi rispetto a quelle più opache e variegata da un punto di vista cromatico. In sintesi, il caso di studio ha evidenziato l'importanza di scegliere il giusto strumento e la tecnologia di rilevamento più adatta alle specifiche caratteristiche del materiale e dell'oggetto in esame, al fine di ottenere risultati accurati e affidabili che possano soddisfare le esigenze della ricerca archeologica e della conservazione del patrimonio culturale.

Il rilievo di una sepoltura eneolitica

I risultati ottenuti con il terzo caso di studio evidenziano come un approccio altamente specializzato al rilievo e al restauro di una sepoltura eneolitica, che impiega una combinazione di strumentazione topografica, 3D scanner e fotogrammetria, permetta di gestire in maniera appropriata operazioni complesse come quella presa in esame. L'oggetto principale di questo studio era

l'analisi di tutte le operazioni di smontaggio e rimontaggio della sepoltura, interrata in una fossa e costruita con lastre di pietra di varie dimensioni, al fine di preservare, studiare e valorizzare l'opera. Il procedimento di rilievo con 3D scanner terrestre è stato meticolosamente pianificato, con l'impiego di 4 stazioni di presa posizionate attorno alla sepoltura e 2 all'interno di essa. La risoluzione selezionata per il rilievo, circa 2 mm per la maglia di punti, è stata cruciale per catturare dettagli minuziosi, come piccole pietre e numeri progressivi assegnati agli elementi costruttivi presenti nella sepoltura. Particolarmente interessante è stato l'approccio senza l'utilizzo di *target* esterni durante il rilievo e l'allineamento delle nuvole di punti, basato invece sul riconoscimento manuale di alcuni punti comuni. Questo metodo ha dimostrato di essere efficiente e ha permesso una rapida acquisizione dei dati senza doversi preoccupare della visibilità dei *target*. I tempi di acquisizione e elaborazione dei dati sono stati minimizzati grazie a questo approccio, con un totale di circa 90 minuti per il rilievo sul campo e due ore aggiuntive per l'elaborazione dei dati. Inoltre, l'integrazione dei dati provenienti da diverse fonti, come i rilievi con 3D scanner e ZScan, è avvenuta senza scalare i modelli, garantendo la coerenza delle misure e una sovrapposizione molto buona delle nuvole di punti. Questo studio ha evidenziato l'efficacia del combinare diverse tecnologie e approcci metodologici per affrontare casi specifici e delicati come la rimozione e il riposizionamento di manufatti archeologici. In particolare, l'attenzione ai dettagli e la pianificazione accurata delle operazioni hanno giocato un ruolo fondamentale nel garantire il successo dell'operazione. In conclusione, il caso di studio sulla sepoltura eneolitica di Corti Beccia ha fornito preziose informazioni sulle metodologie e le tecnologie utilizzate nel rilievo e nel restauro dei reperti archeologici, offrendo una base solida per futuri studi e progetti nel campo della conservazione del patrimonio culturale. In questo caso l'utilizzo di entrambe le tecniche di rilievo è stato di fondamentale importanza, poiché sia la precisione della nuvola di punti rilevata con 3D scanner che la qualità delle immagini acquisite con il sistema metrico hanno avuto eguale importanza nelle fasi di rimontaggio della struttura.

Il rilievo 3D del tempio a *megaron* di Domu de Orgia

L'analisi conclusiva del caso di studio sul restauro del tempio nuragico di Domu de Orgia, situato nel territorio di Esterzili, riflette l'utilità di un approccio multidisciplinare e l'utilizzo efficace di varie tecnologie avanzate di rilievo tridimensionale nella conservazione e valorizzazione del patrimonio archeologico, mostrandone l'utilità nel caso dell'esecuzione di monitoraggi sulle strutture oggetto di interventi di restauro. Il coinvolgimento di diverse metodologie, tra cui strumentazione topografica, 3D scanner a tempo di volo e a differenza di fase, fotogrammetria digitale e rilievo aerofotogrammetrico con la tecnica *Structure from Motion* (SfM), ha consentito una valutazione completa delle condizioni del tempio prima, durante e dopo il restauro. Durante la fase di progettazione, l'impiego del 3D laser scanner a tempo di volo (TOF) Menci GS100 ha fornito una rappresentazione dettagliata delle condizioni preesistenti del monumento, fornendo una base di riferimento cruciale per la pianificazione degli interventi. La raccolta di dati dettagliati ha consentito la definizione di strategie mirate durante la fase di restauro. Dopo il completamento degli interventi di restauro, l'utilizzo del 3D scanner a differenza di fase Faro Focus 120 ha permesso di documentare le modifiche apportate e di valutarne l'efficacia. Le nuvole di punti acquisite sono diventate uno strumento di monitoraggio nel tempo, consentendo una valutazione accurata del successo del ripristino e garantendo la durabilità delle modifiche apportate. L'adozione della metodologia del rilievo aerofotogrammetrico con la tecnica SfM ha arricchito ulteriormente la documentazione del tempio, consentendo una visione più ampia delle dinamiche architettoniche e ambientali. L'integrazione di dati provenienti da diverse fonti ha fornito un quadro completo dello stato del monumento, facilitando la comprensione delle dinamiche strutturali e aprendo la strada a future ricerche e interventi più mirati nella conservazione del tempio a *megaron*. In conclusione, l'applicazione di tecnologie avanzate di rilievo tridimensionale ha svolto un ruolo fondamentale nel successo delle operazioni di restauro e nella loro documentazione, fornendo una base solida per futuri monitoraggi e interventi all'interno del sito. Alla precisione millimetrica delle nuvole di punti acquisite con 3D laser scanner (da sottolineare a maggiore rapidità di

acquisizione e versatilità degli strumenti a differenza di fase) è stata integrata la qualità dell'immagine ottenuta con i rilievi da drone.

La documentazione dell'indagine archeologica e del restauro di un insediamento di età Tardoantica.

Con il caso di studio sull'insediamento di Fusti'e Carca a Tertenia si è voluto presentare un approccio del tutto nuovo e completo nell'utilizzo integrato di diverse tecniche di documentazione e misura per affrontare le complessità di un progetto archeologico esteso e eterogeneo. L'adozione di una vasta gamma di strumenti, compresi GPS, drone, fotogrammetria aerea, scanner 3D e fotocamera sferica, ha consentito una documentazione completa e dettagliata del sito, superando le difficoltà dovute alle dimensioni dell'area, alle variazioni di caratteristiche e alla necessità di documentare i lavori in tempi rapidi. La fase iniziale del progetto ha visto l'utilizzo di uno strumento DGPS per la materializzazione di una rete geodetica su tutto il terreno, fornendo una base stabile per le successive fasi di documentazione. L'impiego di voli con drone e fotogrammetria aerea ha permesso di ottenere modelli 3D texturizzati e ortofoto quotate, fornendo una visione globale del sito e integrando dati dettagliati acquisiti con altre tecniche. L'utilizzo di dispositivi di acquisizione sferica come la camera Panono 360 ha consentito una rapida documentazione di ambienti piccoli e complessi, aggiungendo un ulteriore livello di dettaglio alla documentazione del sito. La fotogrammetria sferica, che rappresenta ancora un elemento di novità, si è dimostrata particolarmente utile per il rilievo di ambienti di piccole dimensioni, con una qualità dell'immagine e un livello di precisione decisamente oltre le aspettative. Il rilievo dettagliato delle strutture murarie è stato eseguito tramite scanner 3D a differenza di fase e il sistema ZScan, garantendo una documentazione accurata dello stato delle murature, fondamentale per il processo di restauro, spesso con la sovrapposizione del dato vettoriale all'orto-immagine. La documentazione dettagliata delle singole unità stratigrafiche è stata eseguita con un approccio integrato, combinando diverse tecniche di rilievo. L'integrazione di GPS differenziale (che ha fornito un'ottima precisione e libertà di movimento su tutta l'area, facilitando il rilevamento dei

limiti e delle quote delle unità stratigrafiche) e fotografie aeree ha permesso di ottenere orto-immagini quotate di grande impatto e molto precise. La fase di post-elaborazione, coinvolgendo diversi software specializzati, è stata altrettanto importante quanto la fase di acquisizione, garantendo un'analisi accurata e una visualizzazione chiara dei dati acquisiti. In conclusione, l'uso combinato di diverse metodologie di rilievo ha fornito una documentazione completa e dettagliata del sito archeologico di Fusti'e Carca, consentendo una comprensione approfondita delle strutture e delle stratificazioni presenti, e dimostrando l'efficacia di un approccio integrato nell'affrontare le necessità documentative di progetti complessi.

L'utilizzo di 3D scanner, ZScan, SfM per la documentazione di otto domus de janas decorate

Il caso di studio era finalizzato alla sperimentazione delle varie tecniche di rilievo tridimensionale negli ipogei funerari della Sardegna, in particolare di alcune domus de janas decorate, integrando tre differenti tipologie di rilievo: 3D laser scanner, *Structure from Motion* e ZScan. È immediatamente emersa la necessità di utilizzare un 3D scanner a differenza fase, poiché questi modelli risultano più compatti, leggeri e trasportabili di quelli a tempo di volo (TOF). Il rilievo con 3D scanner è risultato fondamentale per ottenere una copertura pressoché completa delle superfici e degli ambienti delle domus, con necessità di eseguire scansioni di collegamento tra i vari ambienti; in alcuni casi è stata sufficiente la luce naturale, in altri casi sono stati utilizzati fari a LED, in altri casi ancora il rilievo è stato eseguito al buio a causa degli spazi molto ristretti, ottenendo una nuvola di punti con il solo valore della scala di grigi. Il rilievo fotogrammetrico ha permesso in alcuni casi di rilevare tutti gli ambienti, in altri casi di documentare solo quelli in cui vi era maggiore libertà di movimento e possibilità di illuminarli con fari a LED. Talvolta è stato necessario l'utilizzo di *markers*, talvolta è stato sufficiente il riferimento metrico e visivo delle scansioni. L'utilizzo dello ZScan, a causa delle sue dimensioni e della sua difficile trasportabilità, è stato riservato alla documentazione di dettagli

decorativi, con l'ottenimento di ottimi livelli di precisione, tanto da poter elaborare sezioni sottili.

L'utilizzo di WebGIS, telerilevamento, fotografia e rilievo tridimensionale applicato alla ricerca di recinti e circoli megalitici

La ricerca svolta su un campione del territorio sardo ha dimostrato come l'utilizzo dei dati cartografici consultabili gratuitamente su software GIS e WebGIS sia ormai diventata uno strumento di ricerca e tutela fondamentale. Se a questo metodo si avrà in futuro la possibilità di integrare dati provenienti da rilievi LIDAR (che consentono indagini più dettagliate anche in porzioni di territorio interessate dalla presenza di vegetazione), e da analisi più approfondite delle immagini aeree e satellitari, sarà sicuramente possibile individuare un gran numero di monumenti megalitici e ciclopici. I costi della strumentazione e l'accesso ai database cartografici sono in continua evoluzione, il che fa ben sperare sulla possibilità di avere in futuro maggiori dati a disposizione. L'indagine ha consentito di ottenere dei risultati anche nello studio dei singoli monumenti. Le macroaree studiate si concentrano nella Sardegna centro-meridionale e settentrionale, con particolare attenzione alle zone di altopiano e collinose, luoghi frequentati dai costruttori di megaliti. I dati acquisiti vengono verificati sul campo per confermarne l'autenticità e ottenere informazioni aggiuntive. L'analisi dei dati ha permesso di individuare caratteristiche planimetriche e costruttive dei circoli megalitici, come la disposizione degli ortostati e l'orientamento dell'ingresso, nonché la varietà di materiali utilizzati e le loro dimensioni. Si propone una periodizzazione suddivisa in tre fasi, che riflette lo sviluppo e l'evoluzione dei circoli nel corso del tempo, fino all'età del Bronzo. Sulla funzione dei circoli megalitici permangono dubbi, ma si ipotizza un possibile significato religioso, culturale e calendariale, oltre a un ruolo politico ed economico legato al controllo del territorio. La presenza di circoli all'interno delle necropoli suggerisce l'importanza di questi luoghi per rituali funerari e culturali.

Non esistono, in linea generale, uno strumento o una tipologia universalmente applicabile al rilievo e alla ricerca archeologica; l'archeologo rilevatore deve

essere in grado di scegliere, di volta in volta, la tipologia di acquisizione ed elaborazione del dato più adatta all'oggetto da documentare e possedere dimestichezza con tutte le tecniche a disposizione: 3D scanner, topografia, fotogrammetria terrestre, aerea, sferica e, naturalmente, rilievo manuale. Dai casi di studio affrontati si evince che, per quanto riguarda la documentazione dello scavo e del restauro delle emergenze archeologiche, l'ideale sarebbe avere a disposizione sia la strumentazione topografica (DGPS nel caso di grandi spazi aperti o stazione totale nel caso di contesti più ristretti) che una tecnologia che permetta di ottenere velocemente nuvole di punti o modelli 3D. Il costo elevato dei 3D scanner e la complessità di utilizzo dei software di elaborazione riserva questi strumenti a opere di particolare complessità; al contrario, la semplicità di utilizzo delle tecniche di rilievo fotogrammetriche e i costi contenuti di attrezzature e software ne fanno lo strumento ideale per i piccoli cantieri di indagine e restauro e per tutte quelle operazioni di documentazione giornaliera delle attività che necessitano di rilievi speditivi. Il caso dei reperti risulta essere più complesso: le tempistiche e le finalità del disegno di un reperto vanno ben valutate prima di optare per un rilievo di tipo tradizionale o tridimensionale. Quest'ultimo risulta essere particolarmente utili e produttivo quando si hanno finalità legate alla valorizzazione e divulgazione del dato (visualizzazione in remoto, prototipazione, etc.), mano quando si ha semplicemente bisogno di un disegno schematico finalizzato al confronto tipologico dei materiali.

Resumen Capítulo 10: Conclusiones

El capítulo final resume los resultados obtenidos tras el extenso trabajo de investigación realizado, centrándose en la aplicación de diversas técnicas de levantamiento y documentación. Las experimentaciones, llevadas a cabo a lo largo de un extenso período de tiempo, han destacado la efectividad de varias metodologías, así como sus ventajas y limitaciones específicas. Una parte significativa de la investigación se centra en el levantamiento de artefactos de cerámica, donde se comparan dos técnicas de digitalización: la fotogrametría digital (*Structure from Motion* o SfM) y ZScan Micro. Ambos sistemas ofrecen ventajas y desventajas, y la elección entre los dos depende de las necesidades específicas del proyecto. Por ejemplo, ZScan Micro garantiza una notable precisión pero es más caro y complejo de usar, mientras que la fotogrametría digital es más económica y rápida pero requiere referencias métricas externas. Del mismo modo, se examinan técnicas de levantamiento para bronceos figurados destinados a la creación de prototipos, destacando la importancia de elegir la herramienta adecuada según las características del material y el objeto.

La aplicación de sistemas de documentación en el campo se ha llevado a cabo en actividades muy diversas entre sí: en el desmontaje y montaje de la sepultura calcolítica de Corti Beccia en Sanluri, se ha destacado cómo la fusión de datos obtenidos de escáneres 3D y fotogrametría es fundamental para lograr un resultado apreciable tanto en precisión métrica como en calidad de imagen. En el templo a *megaron* de Domu de Orgia en Esterzili se ha visto cómo este tipo de herramientas permite seguir el trabajo desde las fases de diseño hasta las de verificación y monitoraje, destacando los puntos fuertes de cada tipo de levantamiento. En el caso del estudio sobre la investigación y restauración de un asentamiento tardoantiguo en Fusti'e Carca, en Tertenia, se utiliza un enfoque integrado de diversas técnicas de documentación y medición. En el caso de las *domus de janas* se comprende la utilidad de la documentación en 3D en el estudio de las superficies decoradas. Finalmente, en el caso de los círculos de piedra, se destaca cómo todos los datos disponibles en línea, debidamente analizados, proporcionan información importante y simplifican las actividades de levantamiento. Este enfoque multidisciplinar permite una documentación completa y detallada del yacimiento

arqueológico, proporcionando una base sólida para la comprensión de las estructuras y estratigrafías presentes. En conclusión, el texto subraya la importancia de una selección cuidadosa de las técnicas de levantamiento según las necesidades específicas del proyecto arqueológico, así como la importancia de un enfoque integrado que combine diversas metodologías para obtener resultados precisos y significativos en la investigación y conservación del Patrimonio cultural.

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1 - Rilievo con strumentazione DGPS.....	19
Fig. 2 - Nuvola di punti della sepoltura di Corti Beccia (Sanluri) in Autodesk ReCAP.	37
Fig. 3 - Elaborazione di una planimetria in Autodesk AutoCAD.....	38
Fig. 4 - Allineamento di due nuvole di punti su CloudCompare.....	38
Fig. 5 - Il sistema ZScan: treppiede, slitta graduata e fotocamera metrica.	41
Fig. 6 - Tabelle di riferimento per la scelta della baseline.....	42
Fig. 7 - Rilievo con ZScan. Una tripletta e l'immagine <i>warp</i> (distorta) risultante.	43
Fig. 8 - ZScan: interfaccia del software dopo l'inserimento delle triplette e scelta della baseline.....	45
Fig. 9 - Allineamento delle nuvole di punti ottenute dalle triplette su CloudCompare.	46
Fig. 10 - ZScan Micro: il sistema in fase di rilievo di un bronzo figurato.	46
Fig. 11 - Alcuni degli strumenti utilizzati nel rilievo Structure from Motion: fotocamera digitale reflex, ottiche fisse da 24mm e 60mm, drone, target di riferimento.	47
Fig. 12 - Agisoft Metashape: allineamento delle 62 immagini utilizzate per il rilievo della sepoltura di Corti Beccia con elaborazione della nuvola di punto sparsa....	49
Fig. 13 - Agisoft Metashape: quando si utilizzano per il rilievo una camera metrica o un drone con GPS integrato le immagini vengono posizionate automaticamente nel loro punto di presa originario, con una sorta di pre-allineamento. L'utilizzo di droni con DGPS permette di ottenere modelli in scala egeoreferenziati.	50
Fig. 14 - Agisoft Metashape: generazione della nuvola densa.	51
Fig. 15 - Agisoft Metashape: mesh visualizzata per triangoli.	52
Fig. 16 - Agisoft Metashape: elaborazione della texture.	52
Fig. 17 - DEM, Digital Elevation Model, realizzato nell'ambito del Nuraghe Project nel territorio di Villa Verde, oggetto di indagini archeologiche dal 2013 (fonte: www.ispc.cnr.it).....	53

Fig. 18 - Quadrettatura realizzata in uno scavo archeologico per le attività di rilievo e documentazione (fonte: www.progettostoriadellarte.it).	60
Fig. 19 - - Stazione totale in un cantiere archeologico (fonte www.aretecooperativa.com).	62
Fig. 20 - Veduta dei fori imperiali da pallone aerostatico (fonte: roma.repubblica.it).	65
Fig. 21 - O.G.S. Crawford, "Cropmark" di cerchi di legno (Woodhenge) e siti associati (fonte: www.englishheritage.org.uk).	65
Fig. 22 - Villaggio neolitico individuato dalle rocognizioni aeree di Jhon Bradford (fonte: www.amaraterramia.it).	67
Fig. 23 - Rilievo di una scultura con 3D scanner a luce Strutturata Konica Minolta Vivid 900i (fonte: xts.uchicago.edu).	76
Fig. 24 - Rilievo con 3D laser scanner a differenza di fase all'interno di un ipogeo funerario.....	78
Fig. 25 - DEM (digital elevation model) realizzato con aerofotogrammetria digitale per lo studio di un'area archeologica (fonte: Panchuk Valentyn).	80
Fig. 26 - Pisside proveniente dalla grotta San Michele di Ozieri (fonte: MORAVETTI 2017).....	85
Fig. 27 - Le culture sarde tra IV e III millennio a.C. (fonte: MELIS 2017A).....	86
Fig. 28 - Tazza carenata riferibile al Sub-Ozieri (fonte: LEONELLI 2017).	88
Fig. 29 - Necropoli di Filigosa a Macomer (fonte: MELIS 2017C).....	91
Fig. 30 - Una sepoltura riferibile al Monte Claro in località Gannì a Quartucciu (CA) in fase di scavo (fonte: MANUNZA 2013).	97
Fig. 31 - Sepoltura di Corti Beccia - Sanluri. Vista dall'alto.	101
Fig. 32 - Il tempio a megaron di Domu de Orgia a Esterzili visto dall'alto (fonte: FADDA 2017).	123
Fig. 33 - Domu de Orgia - Esterzili. Veduta frontale prima del restauro, con le operazioni di rilievo in corso.	125
Fig. 34 - Il colle di Santu Antine a Genoni (fonte: www.gooristano.com).	127
Fig. 35 - Corti Beccia (Sanluri): vista frontale della sepoltura.	144
Fig. 36 - Mesh visualizzata come superficie e per triangoli.	159
Fig. 37 - AutoCAD: disegno e restituzione grafica di un reperto.....	160

Fig. 38 - Copie dei bronzi in fase di prototipazione.	195
Fig. 39 - Copie dei bronzi in resina al termine della procedura di stampa e di rimozione della resina di supporto.	197
Fig. 40 - Corti Beccia (Sanluri): blocchi numerati ancora in opera.	201
Fig. 41 - Corti Beccia (Sanluri): rilievo della sepoltura con 3D laser scanner TOF.	202
Fig. 42 - Corti Beccia (Sanluri): nuvole di punti acquisite con ZScan prima dell'allineamento.	204
Fig. 43 - Punti di presa utilizzati per il rilievo della sepoltura.	204
Fig. 44 - Allineamento delle nuvole su CloudCompare utilizzando il rilievo 3D scanner come riferimento metrico.	205
Fig. 45 - Corti Beccia (Sanluri): rimozione delle pietre numerate e documentazione fotografica.	206
Fig. 46 - Corti Beccia (Sanluri): restauro degli elementi lapidei prima del posizionamento.	207
Fig. 47 -- Corti Beccia (Sanluri): scavo della fossa e realizzazione del vespaio.	208
Fig. 48 - Corti Beccia (Sanluri): consolidamento delle pareti.	209
Fig. 49 - Corti Beccia (Sanluri): verifica della posizione e dell'inclinazione delle pietre.	210
Fig. 50 - Corti Beccia (Sanluri): posizionamento delle pietre.	210
Fig. 51 - Corti Beccia (Sanluri): la sepoltura al termine del rimontaggio.	211
Fig. 52 - Il tempio a megaron di Domu de Orgia visto da nord-est in corso del rilievo con 3D laser scanner Menci GS100 prima del restauro.	213
Fig. 53 - Domu de Orgia - Esterzili. Pianta del tempio a megaron dopo la vettorializzazione della nuvola di punti, con indicazione dei punti di stazione del 3D laser scanner.	216
Fig. 54 - Marker riflettente posizionato all'interno della struttura.	217
Fig. 55 - Domu de Orgia. Nuvola di punti con in evidenza i markers utilizzati per la registrazione del modello.	218
Fig. 56 - Domu de Orgia. Rilievo completo del tempio a megaron: nuvola di punti RGB.	220

Fig. 57 - Domu de Orgia. Elaborazione di una sezione orizzontale sulla nuvola di punti.	222
Fig. 58 - Domu de Orgia: sezione prospettica con nuvola di punti RGB.	223
Fig. 59 - Domu de Orgia. Fasi di rilievo con 3D scanner Faro Focus.	224
Fig. 60 - Faro Focus 3D con monitor di gestione integrato.	225
Fig. 61 - Domu de Orgia: riconoscimento dei markers.	226
Fig. 62 - - Domu de Orgia: allineamento delle nuvole di punti provenienti dai due differenti rilievi 3D scanner.	227
Fig. 63 - Domu de Orgia: in basso sezione prima dell'intervento di restauro; in alto sezione dopo l'intervento.	228
Fig. 64 - Domu de Orgia: riposizionamento dei markers.	229
Fig. 65 - Domu de Orgia. Rilievo con drone.	230
Fig. 66 - Il sito di Fusti'e Carca al termine delle indagini e del restauro.	233
Fig. 67 - Fusti'e Carca (Tertenia): uno dei rilievi eseguiti con drone; in evidenza il posizionamento dei punti di presa, organizzati a più livelli di quota e per strisciate.	236
Fig. 68 - Fusti'e Carca (Tertenia): vista del modello tridimensionale realizzato con fotogrammetria digitale.	236
Fig. 69 - Fusti'e Carca (Tertenia): pianta di strato elaborata con la vettorializzazione delle ortofoto ottenute da rilievo SfM.	237
Fig. 70 - Fusti'e Carca (Tertenia): rilievo con GPS dei limiti e delle quote delle unità stratigrafiche.	239
Fig. 71 - Fusti'e Carca (Tertenia): rilievo della USM 37 prima dello smontaggio, dall'allineamento delle immagini all'elaborazione della texture.	240
Fig. 72 - Fusti'e Carca (Tertenia): simulazione della quattro postazioni utilizzate per il rilievo dell'ambiente I con Panono 360.	241
Fig. 73 - Fusti'e Carca (Tertenia): modello 3D non ancora texturizzato ottenuto con fotogrammetria sferica.	242
Fig. 74 - Fusti'e Carca (Tertenia): rilievo dell'USM 30 all'interno dell'ambiente VI con sistema ZScan prima dello smontaggio del muro.	243
Fig. 75 - Fusti'e Carca (Tertenia): ricostruzione della USM 30.	244

Fig. 76 - Fusti'e Carca (Tertenia): sezione delle nuvole di punti della USM 30 prima e dopo il restauro.....	245
Fig. 77 - Fusti'e Carca (Tertenia): planimetria finale con indicazione delle scansioni eseguite.	247
Fig. 78 - Quadranti indagato della CTR Sardegna.....	294
Fig. 79 - Quadranti indagato della CTR Sardegna.....	295
Fig. 80 - Ricerca di metadati su WebGIS.	296
Fig. 81 - DGPS nelle fasi di rilievo di un circolo di pietre.	298
Fig. 82 - 3D laser scanner: rilievo di un circolo di pietre.	300

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 Specifiche tecniche stazione totale	24
Tabella 2 Specifiche tecniche ricevitore DGPS	27
Tabella 3 Specifiche tecniche Palmare di gestione	28
Tabella 4 Specifiche tecniche 3D laser scanner CAM2 Faro Focus 3DS 120 (pagina seguente)	31
Tabella 5 Scheda tecnica 3D laser scanner Trimble GS100	34
Tabella 6 Specifiche tecniche 3D scanner Scan System	36
Tabella 7. Confronto tra sistema ZScan Micro e <i>Structure from Motion</i> (SfM) nel rilievo dei manufatti in ceramica.	339
Tabella 8. Confronto ipotetico tra ZScan Micro, <i>Structure from Motion</i> (SfM) e 3D scanner a triangolazione nel rilievo dei manufatti in ceramica.	351
Tabella 9. Confronto tra le operazioni di rilievo dei bronzi svolte con ZScan Micro, <i>Structure from Motion</i> (SfM) e 3D scanner.	356
Tabella 10. Confronto tra scanner a tempo di volo (TOF), ZScan e <i>Structure from motion</i> nel rilievo di una sepoltura.	370
Tabella 11. Tabella comparativa tra 3D laser scanner TOF, 3D scanner a differenza di fase e <i>Structure from Motion</i> nel rilievo del tempio di Domu de Orgia.	378

BIBLIOGRAFIA

ABER *ET ALII* 2002: Aber J. S., Aber S. W., Pavri F., *Unmanned small-format aerial photography from kites for acquiring large scale, high-resolution, multiview-angle imagery*. ISPRS Archives, Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS, Denver, CO, USA.

ADAMESTEANU 1964: Adamesetranu D., *Contributo dell'aerofototeca archeologica del Ministero P.I. alla soluzione dei problemi di Topografia Antica in Italia*, in Atti del X Congresso Internazionale di fotogrammetria, Lisbona 1964.

ADAMESTEANU 1965: Adamesteanu D., *La fotografia aerea e le vie della Magna Grecia*, in Vie di Magna Grecia: atti del secondo Convegno di studi sulla Magna Grecia, tenuto a Taranto dal 14 al 18 ottobre 1962, Taranto: 39-58.

ALTAN *ET ALII* 2004: Altan M. O., Celikoyan T. M., Kemper G., Toz G., *Balloon photogrammetry for cultural heritage*. ISPRS Archives Vol. XXXV-B5, XX ISPRS Congress, Istanbul, Turkey: pp. 964-968.

ALTUNA-ARESO 1977: Altuna J., Areso P., *Excavaciones en los cromlechs de Oyanleku (Oyarzun, Guipozcoa)*, in MUNIBE Sociedad de Ciencias ARANZADI, 1-2, San Sebastian: 65-76.

ALVISI 1962: Alvisi G., *Problemi di viabilità nell' Apulia settentrionale*, in Archeologia classica: rivista semestrale dell'Istituto di archeologia dell'Università di Roma, Vol. 14: 148-161.

ALVISI 1973-1974: Alvisi G., *Note sulla resa delle pellicole pancromatiche, infrarosso e infracolore ai fini della fotointerpretazione archeologica*, in Atti del Centro di Studi e Documentazione sull'Italia romana V, 1973-1974.

ALVISI 1976-1977: Alvisi G., *La fotografia aerea come mezzo per lo studio del territorio*, in Bollettino del Lazio Meridionale IX, 1976-1977.

- ALVISI 1979: Alvisi G., *Fotografia aerea e storia urbanistica*, Roma.
- ALVISI 1989: Alvisi G., *La fotografia aerea nell'indagine archeologica*, Roma.
- ALVITO-MORAVETTI 2010: Alvito G., Moravetti A., *Sardegna archeologica dal cielo dai circoli megalitici alle torri nuragiche*, Sassari.
- ANDREOZZI 2003: Andreozzi L., *Il laser scanner nel rilievo di architettura. La nostra esperienza*, Enna.
- ANTINOZZI ET ALII 2021: Antinozzi S., Ronchi D, Barba S., *3Dino System, come accorciare le distanze nei rilievi di precisione*, in 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione Congresso della Unione Italiana per il Disegno, 16, 17 e 18 settembre 2021, Reggio Calabria e Messina.
- ANTONA 1992: Antona A., *Il nuraghe Albucciu e i monumenti di Arzachena*, Sardegna archeologica. Guide e itinerari-19, Sassari.
- ARCADU ET ALII 2012: Arcadu G., Basoli P., Foschi Nieddu A., Paschina I., *Le grotte di San Michele e le caratteristiche identitarie della Cultura di Ozieri*, in Luglié C., Cicilloni R. (a cura di), *La Preistoria e la Protostoria della Sardegna. Volume II – Comunicazioni, Atti della XLIV Riunione Scientifica dell'Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Cagliari, Barumini, Sassari 23-28 novembre 2009*), Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Firenze: pp. 509-516.
- ARCHEOSYSTEM 1990A: Consorzio Archeosystem, *Progetto i nuraghi. Ricognizione archeologica in Ogliastra, Barbagia, Sarcidano. I reperti*. Milano.
- ARCHEOSYSTEM 1990B: Consorzio Archeosystem, *Progetto i nuraghi. Ricognizione archeologica in Ogliastra, Barbagia, Sarcidano. Il territorio*. Milano.
- ARRIGHETTI 2012: Arrighetti A., *Tecnologie fotogrammetriche e registrazione 3d della struttura materiale: dal rilievo alla gestione dei dati*, in *Archeologia e Calcolatori*, 23: pp. 283 - 296.
- ARTIZZU 1992: Artizzu G., *La Sardegna e la politica religiosa dei re Vandali*, in *Studi Sardi*, XXX: pp. 497-512.

ATZENI 1962A: Atzeni E., *I villaggi preistorici di San Gemiliano di Sestu e di monte Ollàdiri presso Cagliari e le ceramiche di "facies" monte Claro*, in Studi Sardi, XVII: pp. 3-226.

ATZENI 1962B: Atzeni E., *I villaggi preistorici di San Gemiliano di Sestu e di Monte Ollàdiri presso Cagliari e le ceramiche di "facies" Monte Claro*, in Studi Sardi, XVII: pp. 3-226.

ATZENI 1987: Atzeni E., Atzeni E. 1987, *Il tempio a pozzo di Cuccuru Nuraxi, Settimo San Pietro - Cagliari (Nota preliminare)*, in AA.VV., 1987, *La Sardegna nel Mediterraneo tra il secondo e il primo millennio a.C.*, Atti del II Convegno di Studi Un millennio di relazioni fra la Sardegna e i Paesi del Mediterraneo, Cagliari., pp. 279-297.

ATZENI 1988: Atzeni E., *Tombe megalitiche di Laconi (Nuoro)*, in *L'Età del Rame in Europa*, Atti del Congresso Internazionale (Viareggio, 15-18 ottobre 1987), RdA, 7, Firenze: pp. 526-527.

ATZENI 1998: Atzeni E., *La tomba ipogeico megalitica di Bingia 'e Monti*, in *Simbolo ed enigma*, pp. 254-260.

ATZENI 2004: Atzeni E., *La scoperta delle statue-menhir. Trent'anni di ricerche archeologiche nel territorio di Laconi*, Cagliari.

ATZENI ET ALII 2001: Atzeni E., Cicilloni R., Ragucci G., Usai E., *Il complesso megalitico pre-protostorico di Cuccurada - Mogoro (Or)*, in *Megalitismo preistorico*: pp. 31-35.

ATZENI-SANTONI 1989: Atzeni E., Santoni V., *L'Età prenuragica: Il Neolitico. L'Eneolitico*, in Aa.Vv., *Il Museo Archeologico di Cagliari*: pp. 31-56.

ATZORI 1960: Atzori G., *Stazioni prenuragiche e nuragiche di Simaxis (Oristano)*, In Studi Sardi, XVI (1957-1959): pp. 267-299.

ATZORI 1987: Atzori G., *Le ceramiche nuragiche al tornio*, in AA.VV., 1987, *La Sardegna nel Mediterraneo tra il secondo e il primo millennio a.C.*, Atti del II Convegno di Studi Un millennio di relazioni fra la Sardegna e i Paesi del Mediterraneo, Cagliari: pp. 81-89.

BADAS 1987: Badas U., *Genna Maria-Villanovaforru (Cagliari). I vani 10/18. Nuovi apporti allo studio delle abitazioni a corte centrale*, in AA.VV., *La Sardegna nel Mediterraneo tra il secondo e il primo millennio a.C.*, Atti del II Convegno di Studi Un millennio di relazioni fra la Sardegna e i Paesi del Mediterraneo, Cagliari: pp. 133-146.

BAFICO 1986: Bafico S., *Materia d'importazione dal villaggio nuragico di Sant'Imbenia*, in AA.VV., *Società e cultura in Sardegna nei periodi orientalizzante e arcaico. Rapporti tra Sardegna, Fenici, Etruschi e Greci*. Atti del I Convegno di Studi Un millennio di relazioni tra la Sardegna e i Paesi del Mediterraneo, Cagliari: pp. 91-93.

BAGNOLO ET ALII 2022: Bagnolo V., Corda A. M., Argiolas R., Paba N., *Tecniche digitali per la documentazione dei beni archeologici. Rilievo, modellazione e comunicazione*, in Martorelli R. (ed.), *Ancient and modern knowledges Transmission of models and techniques in the artistic and handicraft products in Sardinia through the centuries*, *Saggi di Archeologia e Antichistica/1*, collana diretta da Riccardo Cicilloni e Carlo Lugliè: 391 – 406.

BARADEZ 1935: Baradez J., *En survolant cinquante siècles d'histoire: de Paris à Addis-Abéba*, Plon.

BARADEZ 1949: Baradez J., *Fossatum Africae. Recherches aériennes sur l'organisation des confins sahariens à l'époque romaine*, Paris-Alger.

BARAZZETTI ET ALII 2022: Barazzetti L., Previtali M., Roncoroni F., *3d modeling with 5k 360° videos*, in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLVI-2/W1-2022 9th Intl. Workshop 3D-ARCH “3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures”, 2–4 March 2022, Mantua, Italy: 65 - 71.

BARIBEAU ET ALII 1992: Baribeau R., Rioux M., Godin G., *Recent advances in the use of a laser scanner in the examination of paintings*, in V. TOOD et al. (eds.), *Proceedings of Restoration '92 Conference (Amsterdam 1992)*, London, United Kingdom Institute for Conservation: 69-73

BARRILE *ET ALII* 2015: Barrile V., Bilotta G., Lamari D., Meduri G. M., Monardi Trungadi U., Ricciardi A., *Computer vision/structure for motion per la diffusione dei beni culturali*, Atti XIX Conferenza Nazionale ASITA - 29-30 Settembre – 1 ottobre 2015, Lecco - Polo di Lecco del Politecnico di Milano: pp. 51 - 60.

BARTOLONI 2003: Bartoloni P., *Fenici e Cartaginesi nel Sulcis*, Cagliari.

BARTOLONI-BERNARDINI 2004: Bartoloni P., Bernardini P., *I Fenici, I Cartaginesi e il mondo indigeno di Sardegna tra l'VIII e il III sec. a.C.*, in *Sardinia Corsica et Baleares Antiquae* 2: pp. 57-73.

BARTOLUCCI 2009: Bartolucci D., *Principi di laser scanning 3d: hardware - metodologie applicative - esempi*, Palermo.

BASOLI 1990: Basoli P., *La cultura di Ozieri e il neolitico tardo*, in *Sardegna archeologica*: Roma, S. Michele 4 dicembre 1990-4 gennaio 1991: pp. 27-31.

BASOLI 1998: Basoli P., *Aspetti del megalitismo nel territorio di M. Acuto (Sassari). Considerazioni preliminari*, in Balmuth M.S., Tykot R.H. (eds.) 1998, *Sardinian and Aegean Chronology. Towards the Resolution of Relative and Absolute Dating in the Mediterranean*, «Proceedings of the International Colloquium “Sardinian Stratigraphy and Mediterranean Chronology”» (Tufts University, Medford, Massachusetts, March 17-19, 1995), «*Studies in Sardinian Archaeology*», V, Oxford: pp. 141-158.

BASOLI-DORO 2012: Basoli P., Doro L., *Il sito fortificato di Sa Mandra Manna (Tula-SS) nel quadro del megalitismo e dei successivi sviluppi culturali*, in Luglié C., Cicilloni R. (a cura di), *La Preistoria e la Protostoria della Sardegna*, Atti della XLIV Riunione Scientifica dell'IIPP (Cagliari- Barumini-Sassari, 23-28 novembre 2009), Firenze., II: pp. 601-606.

BEAUFFORT-DUSARIEZ 1995: Beaufort G., Dusariez M., *Aerial photography taken from a kite: Yesterday and Today*, Pitman

BECOT 2015: Becot C., *Photographie aeriennes avec cerf-volant comment s'y prendre*, Paris

BERNABÒ BREA-CAVALIER 1980: Bernabò Brea L., Cavalier M., *Melingunis Lipara IV. L'acropoli di Lipari nella preistoria*, Palermo.

BERNARDINI 2007: Bernardini P., *Nuragici, Sardi e Fenici tra storia (antica) e ideologia (moderna)*, in *Sardinia Corsica et Baleares Antiquae*, 5: pp. 11-30.

BERNARDINI 2017: Bernardini P., *Santuari, Culti e ideologia del potere nella Sardegna nuragica della Prima età del Ferro*, in Moravetti A., Alba L., Foddai L. (a cura di), *La Sardegna Nuragica. Storia e materiali. Corpora delle Antichità della Sardegna*, Sassari: pp. 211-222.

BIANCHINI 2008: Bianchini M., *Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia*, Roma.

BITELLI ET ALII 2003; Bitelli G., Tini M.A., Vittuari L., *Low-height aerial photogrammetry for archaeological orthoimaging production*. ISPRS Archives Vol. XXXIV, Part 5/W12, pp. 55-59.

BLASCO ET ALII 2016: Blasco P.D., Beolchini V., Peña-Chocarro L., Pueyo O., Casas A., *Metodologie d'indagine non invasiva a Tusculum: la ricerca archeologica senza scavare*, in *Lazio e Sabina*. 10, Atti del convegno "Decimo incontro di studi sul Lazio e la Sabina, Roma, 4-6 giugno 2013: pp. 327-330.

BOGACKI ET ALII 2008: Bogacki M., Malkowski W., Misiewicz K., *Kite aerial photography (KAP) as a tool for completing GIS models. Ptolemais (Libya) case study*, in Lasaponara, R., Masini, N., Aracne (Eds.), *Remote Sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management. Proceedings of the 1st International EARSeL Workshop*, CNR, Roma, pp. 329-332.

BONINU 2009: Boninu A., *La fonte nuragica di Su Lumarzu, Bonorva (SS)*, in Luglié C., Cicilloni R. (a cura di), *La Preistoria e la Protostoria della Sardegna. Volume II – Comunicazioni, Atti della XLIV Riunione Scientifica dell'Istituto*

Italiano di Preistoria e Protostoria, Cagliari, Barumini, Sassari 23-28 novembre 2009, Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Firenze: pp. 1457-1463.

BONNIN *ET ALII* 2018; Bonnin N., Van Andel A. C., Kerby J. T., Piel A. K., Pintea L., Wich S. A., *Assessment of Chimpanzee Net Detectability in Drone-Acquired Images*, in *Drones*, 2 (2), 17.

BORNAZ *ET ALII* 2005: Bornaz L., Porporato C., Rinaudo F., *Il rilevamento di reperti archeologici*, in Atti IX conferenza nazionale ASITA, centro congressuale Le ciminiere, Catania 15-18 novembre 2005.

BORNAZ *ET ALII* 2007: Bornaz L., De Gattis G., Domaine R., Focareta R., Porporato C., Rinaudo F., *Rilievo sperimentale 3D ad alta definizione di una delle steli antropomorfe rinvenute nel sito archeologico di Saint-Martin de Corleans*, Atti XI conferenza nazionale ASITA, Centro congressi Lingotto, Torino 6 - 9 novembre 2007: pp. 475-482.

BOSCHI 2022: Boschi F., *Archeologia funeraria e tecnologie digitali: la tomba del principe di Corinaldo dalla documentazione alla fruizione*, *Archeologia e Calcolatori*, 33.2: pp. 235 - 254.

BOSCHIAN *ET ALII* 2000-2001: Boschian G., Brilli P., Falchi P., Fenu P., Martini F., Pitzalis G., *ET AL.*, *Prime ricerche nell'abitato neolitico di Contraguda (Perfugas- Sassari)*, in *Rivista di Scienze Preistoriche* LI: 235 – 237.

BOSCO-D'ANDREA 2019: Bosco A., D'Andrea A., *RIFLESSIONI l'arte del disegno/il disegno dell'arte REFLECTIONS the art of drawing/the drawing of art*, in 41°Convegno internazionale dei docenti delle discipline della rappresentazione, UID Perugia 2019: pp. 425-430.

BRADFORD 1947: Bradford J.S.P., 1947, "Etruria from the air", in *Antiquity*, n. 21: pp. 74-83.

BRADFORD 1949: Bradford J.S.P., *Buried Landscaper in southern Italy*, in *Antiquity*, n. 23: 58-72.

BRADFORD 1950: Bradford J.S.P., *The Apulia expedition:an interim report*, in *Antiquity*, n.24:84-95.

BRADFORD 1957: Bradford J.S.P., *Ancient Landscapes*, London

BRADFORD-WILLIAMS-HUNT 1946: Bradford J.S.P., Williams-Hunt P., *Siticulosa Apulia*, in *Antiquity*, n. 20: 191-200.

BERTOCCI-PARRINELLO 2015: Bertocci S., Parrinello S., *Digital Survey and documentation of the Archaeological and Architectural sites*, Unesco World Heritage List, Firenze: 206 – 207.

BUA 2016: Bua S., *La rappresentazione tridimensionale dell'architettura e dell'archeologia: sistemi informatici per la documentazione e la valorizzazione dei Beni Culturali*, Firenze.

BURL 1987: Burl A., *Guide des dolmens et menhirs bretons: le mégalithisme en Bretagne*, Parigi.

BURL-MILLIGAN 1999: Burl A., Milligan M., *Circles of Stone*, The Harvill Press.

CAILLEMER 1955: Caillemer A., *Topographie, photogrammétrie*, Parigi.

CAMARA-SPANEDDA 2014: Cámara Serrano J.A., Spanedda L., *L'organizzazione sociale nuragica. Note e ipotesi*, in Moravetti A., Alba L., Foddai L. (a cura di), *La Sardegna Nuragica. Storia e materiali. Corpora delle Antichità della Sardegna*, Sassari: pp. 151-160.

CAMPANA 2003: Campana S., *Geografia storica, telerilevamento e tecnologia GIS: una rassegna bibliografica*, in *Trame spaziali, Quaderni di Geografia Storica del Dipartimento di Storia dell'Università di Siena*, All'Insegna del Giglio, Firenze: 99-104.

CAMPANA-FRANCOVICH 2005: Campana S., Francovich R., *Linking remote sensing and infra-site analysis to the reconstruction of rural settlement and landscape patterns*, in *The Reconstruction of Archaeological Landscapes through*

Digital Technologies (Roma, 3-5 novembre 2003), Archaeopress BAR INTERNATIONAL SERIES 1379, Cambridge, pp. 61-73.

CAMPANA-FRANCOVICH 2006: Campana S., Francovich R., *Laser scanner e GPS paesaggi archeologici e tecnologie digitali 1*.

CAMPANA-SORDINI 2006: Campana S., Sordini M., *Laser scanner e GPS in archeologia: geografia dei servizi e delle risorse in internet*, in Campana S., Francovich R. (eds.) *Laser scanner e GPS: paesaggi archeologici e tecnologie digitali, 1: I workshop*, Grosseto, 4 marzo 2005: pp. 327 – 341.

CAMPUS 2008: Campus F., *I sistemi territoriali dell'altopiano di Pran'e Muru*, in Campos F., Cossu T., Leonelli V., LoSchaivo F., Perra M., Sanges M. (a cura di), *Il paesaggio nuragico sull'altopiano di Pran'e Muru*, Orroli: pp. 97-108.

CAMPUS 2012: Campus F., *Il complesso cultuale di Sa Carcaredda, Villagrande Strisaili*, in Campus F., Leonelli V. (a cura di) *Simbolo di un simbolo: i modelli di nuraghe*, Ittireddu: Museo civico archeologico ed etnografico di Ittireddu, Monteriggioni: pp. 240-245.

CAMPUS-LEONELLI 2000: Campus F., Leonelli V., *La tipologia della ceramica nuragica. Il materiale edito*, Viterbo.

CAMPUS-LEONELLI 2006A: Campus F., Leonelli V., *La Sardegna nel Mediterraneo fra l'età del Bronzo e l'età del Ferro. Proposta per una distinzione in fasi*, in AA.VV., *Studi in onore di Renato Peroni*, Firenze: pp. 379-392.

CAMPUS-LEONELLI 2006B: Campus F., Leonelli V., *La cisterna del nuraghe Adoni di Villanovatulo (Nu)*, *Cronache di Archeologia* 5: pp. 47-70.

CAMPUS-USAI 2011: Campus F., Usai L., *Sorgono. Complesso archeologico Biru 'e Concas*, in *Erentzias*, 1, *Notiziario*, Sassari: pp. 420-422.

CAMPUS-USAI 2015: Campus F., Usai L., *Nuraghe Santu Antine di Torralba. Ingegneria idraulica nell'età del Bronzo*, in Minoja M.E., Salis G., Usai L. (a cura di), *L'isola delle torri. Giovanni Lilliu e la Sardegna nuragica*, Catalogo

della mostra (Cagliari, 15 marzo-30 settembre 2014, Roma, 28 novembre 2014-7 aprile 2015, Milano, 6 maggio 2015-14 febbraio 2016), Sassari: pp. 321- 324.

CANNAS 1972: Cannas V.M., *Guida alla Carta Archeologica del comune di Tertenia*, Cagliari.

CANNAS 1999: Cannas V.M., Tertenia. *Un ripostiglio monetario del II-IV sec. d.C.*, in Studi Ogliastrini, 5: pp. 11-31.

CASTAGNOLI 1961: *Contributi della fotografia aerea agli studi di topografia antica in Italia*, in Atti del settimo Congresso internazionale di archeologia classica (Roma-Napoli, 1959) Roma, pp. 41-45.

CASTAGNOLI 1969: *La prospezione aerea negli studi di topografia antica*, in Quaderni della ricerca scientifica, n. 60.

CASTALDI 1999: Castaldi E., *Sa Sedda de Biriai (Olivena, Nuoro, Sardegna). Villaggio d'altura con santuario megalitico di cultura Monte Claro*, Roma.

CAVALIER-DEPALMAS 2008: Cavalier M., Depalmas A., *Materiali sardi nel villaggio di Lipari. I frammenti ceramici e le correlazioni*, RSP LVIII: pp. 281-300.

CAVALLO 1987: Cavallo G., *Un edificio altomedievale nel territorio di Ulassai. La chiesa di San Giorgio*, in Studi Ogliastrini, 2: pp. 63-74.

CECCARONI ET ALII 2011: Ceccaroni F., Caldarelli D., Nannini P., Sebastiani A., *Rilievo speditivo 3d con tecnica fotogrammetrica ZSCAN EVO dell'area templare di Scoglietto (Alberese - Gr)*, in Atti XVI Conferenza Nazionale ASITA, Fiera di Vicenza, 6-9 novembre 2012: pp. 331 – 337.

CHEVALLIER 1971: Chevallier R., *La photographie aérienne*, Bruxelles.

CHIPPINDALE ET ALII 2012: Chippindale C., Baker F., Marretta A., *PITOTI: digital rock-art from prehistoric Europe: heritage, film, archaeology = Arte rupestre digitale dell'Europa preistorica: beni culturali, film, archeologia*, Ginevra, Milano.

CIANCI-COLACECI 2022: Cianci M.G., Colaceci S., *Conoscenza e di vulgazione del patrimonio culturale. Analisi e rilievo del Mausoleo di Sant'Urbano sulla via Appia Antica*, in *Archeomatica*, 13(1): 6 – 9.

CICILLONI 2009A: Cicilloni R., *I dolmen della Sardegna*, Mogoro.

CICILLONI 2009B: Cicilloni R., *Montessu, una necropolo preistorica di 5000 anni fa*, Mogoro.

CICILLONI 2012: Cicilloni R., *Il megalitismo preistorico in Sardegna: aspetti cronologici ed evolutivi*, in Carla del Vais (a cura di) *Epi oinopa ponton. Studi sul Mediterraneo antico in ricordo di Giovanni Tore*, Oristano: pp. 121-134.

CICILLONI 2013: Cicilloni R., *Il megalitismo della Sardegna*, in Tanda G. (a cura di), *Iberia e Sardegna. Legami linguistici, archeologici e genetici dal Mesolitico all'Età del Bronzo*, Atti del Convegno internazionale "Gorosti U5b3" (Cagliari-Alghero, Giugno 12-16, 2012), Città di Castello (PG): 250-270.

CICILLONI 2015: Cicilloni R., *Le armi, la guerra e la caccia*, in Minoja M.E., Salis G., Usai L. (a cura di), *L'isola delle torri. Giovanni Lilliu e la Sardegna nuragica*, Catalogo della mostra (Cagliari, 15 marzo-30 settembre 2014, Roma, 28 novembre 2014-7 aprile 2015, Milano, 6 maggio 2015-14 febbraio 2016), Sassari: pp. 200-204.

CICILLONI 2017: Cicilloni R., *I dolmen della Sardegna*, in *La Sardegna Preistorica*, in Storia, materiali, monumenti, in Moravetti A., Melis P., Foddai L., Alba E. (a cura di), *La Sardegna preistorica. Storia, materiali, monumenti. Corpora delle Antichità della Sardegna*: pp. 137-144.

CICILLONI ET ALII 2018: Cicilloni R., Forci A., Cabras M., *Aspetti di continuità e cambiamento nel paesaggio archeologico del Gerrei (Sardegna sud-orientale - Italia) dalla preistoria all'età medievale*, in *Traces in Time* n. 7.

CICILLONI-MIGALEDDU 2008: Cicilloni R., Migaleddu M., *Monumenti nuragici in territorio di Teulada (Cagliari): note preliminari*, in Santoni V., Bacco G. (a

cura di) La Civiltà Nuragica 2. Nuove acquisizioni, Atti del convegno, Senorbì: pp. 433-448.

CLARKE 1978: Clarke D.L., *Analytical Archaeology*, London

COCCO-USAI 1988: Cocco D., Usai L., *Un monumento preistorico nel territorio di Cuglieri*, in Ampsicora e il territorio di Cornus, Atti del II Convegno sull'archeologia romana e altomedievale nell'Oristanese - Cuglieri, 1985, Taranto: pp. 13-18.

COLLAZO, LOPEZ 2023: Collazo J.R., Lopez J.A., *La fotogrametría SfM mediante UAS para la documentación de las fortificaciones de la Alpujarra (Granada y Almería, España)*, in Ulivieri (Eds.) *Defensive Architecture of the Mediterranean / Vol. XV / Bevilacqua*, Pisa University Press: 1139 – 1146.

CONGIU 2009: Congiu G., *Modalità insediative preistoriche in Barbagia: il caso di Sirilò (Orgosolo-NU)*, in Melis M.G. (a cura di) *Uomo e territorio: dinamiche di frequentazione e di sfruttamento delle risorse naturali nell'antichità: atti del Convegno nazionale dei giovani archeologi: Sassari 27-30 settembre 2006*, Muros: pp. 83-89.

CONGIU 2010: Congiu G., *AutoCAD Map 3D 2010&2011 - Cartografia dal CAD al GIS*, GC Edizioni, Quartu Sant'Elena.

CONTU 1948: Contu E., *Esterzili (Nuoro). Edificio megalitico rettangolare di Domu de Orgia in località Cuccureddi*, in *Studi Sardi*, VIII: pp. 313-317.

CONTU 1962: Contu E., *Enas de Cannuia (Bessude)*, in *Rivista di Scienze Preistoriche* XVII: p. 300.

CONTU 1961A: Contu E., *Mandra Antine (Thiesi)*, in *Rivista di Scienze Preistoriche (notiziario)* XVI: p. 275.

CONTU 1961B: Contu E., *Tombe preistoriche dipinte e scolpite di Thiesi e Bessude (Sassari)*, in *Rivista di Scienze Preistoriche* XIX: pp. 233-263

CONTU 1996: Contu E., *La Sardegna, Problematica e inquadramento culturale*, in Cocchi Genick D. (ed.), *L'antica età del Bronzo in Italia*, «Atti del Congresso di Viareggio», Firenze: pp. 385-396.

CONTU 1997: Contu E., *La Sardegna preistorica e nuragica*, I e II, Arti Grafiche Editoriali Chiarella, Sassari.

CONTU 1998: Contu E., *La cultura del Vaso Campaniforme in un ipogeo di Marinaru (Sassari)*, in *Simbolo ed Enigma*: pp. 286-291

CONTU *ET ALII* 2004: Contu E., Contu E., Tanda G., Bagella S., Canino G., Depalmas A., Marras G., Melis M.G., Meloni G.M. 2004, *Nuraghi, santuari, tombe monumentali*, in Cocchi Genick (a cura di) *L'età del bronzo recente in Italia*, Atti del Congresso nazionale, Viareggio: pp. 383-398.

COSENTINO 2002: Cosentino S., *Introduzione*, in Cosentino S. a cura di, *Ai confini dell'impero. Storia, arte e archeologia della Sardegna bizantina*, M&T Sardegna, Cagliari: pp. III-V.

COSSU-PERRA 1998: Cossu T., Perra M., *Two contexts of the Bronze Age in the Nuraghe Nolza of Meana Sardo (Nuoro)*, in Moravetti A. (a cura di) *Sardinia, Papers from the EAA hird Annual Meeting at Ravenna 1997*, BAR 719, Oxford: pp. 97-109.

CRAWFORD 1924: Crawfords O.G.S., *Air Survey and Archaeology*, in Ordnance Survey Professional Papers n.7, London.

D'AMELIO *ET ALII* 2013: D'Amelio S., Maggio V., Villa B., *3D Modelling per la documentazione archeologica: verifiche metriche*, Atti XVII Conferenza Nazionale ASITA, Riva del Garda, 5-7 novembre 2013: pp. 513 – 519.

D'ANDREA-BARBARINO 2012: D'Andrea A., Barbarino M., *Modellare lo scavo archeologico: esperienze e tecniche a confronto*, in *Archeologia e Calcolatori*, 23: pp. 229-245.

D'ANDREA ET ALII 2020: D'Andrea A., Bosco A., Coralini A., Fiorini A., Valentini R., *Ercolano. Documentare e studiare siti archeologici storici: il contributo delle tecnologie digitali*, in FOLDER 2020: p. 485.

DELIGIA ET ALII 2014: Deligia G.G., Ruiz M.F., Spanedda L., *La decorazione dell'ingresso della domus de janas di Perdonighéddu (Sorgono, NU): applicazione dell'estensione DStretch del software ImageJ*, in Archeologia e calcolatori, 25: pp. 157-174.

DE MARTINI 2023: De Martini M.G., *La necropoli di Mandra Antine*, in Tanda G., Doro L., Usai L., Buffoni F. (a cura di), (Candidatura UNESCO 2021) Arte e architettura nella preistoria della Sardegna. Le domus de janas, Condaghes, Cagliari: pp. 152-157.

DEMARTIS 1986: Demartis G.M., *La necropoli di Anghelu Ruju*, Sardegna Archeologica. Guide e itinerari 2, Delfino, Sassari.

DEMARTIS 1990: Demartis G.M., *Putifigari (Sassari). Località Monte Siseri, Tomba dell'architettura dipinta*, in Bollettino di Archeologia 1-2: pp. 251-252.

DEMARTIS 1998: Demartis G.M., *La cultura del Vaso Campaniforme ad Anghelu Ruju (Alghero-Sassari)*, in Simbolo ed Enigma: pp. 281-285.

DEPALMAS 2005: Depalmas A., *Luoghi di culto e santuari della Sardegna nuragica*, Histria Antiqua, 13: pp. 39-47.

DEPALMAS 2007: Depalmas A., *Differenziazioni territoriali di aspetti culturali nell'età del Bronzo Recente della Sardegna*, in Angiolillo S., Giuman M., Pasolini A. (a cura di), Ricerca e confronti 2006. Giornate di studio di archeologia e storia dell'arte, Quaderni di Aristeo, Cagliari: pp. 43-52.

DEPALMAS 2009A: Depalmas A., *Il Bronzo Recente della Sardegna*, in Atti della XLIV Riunione Scientifica dell'Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Cagliari, Barumini, Sassari, 23-28 novembre 2009, I - Relazioni generali, Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Firenze: pp. 131-140.

DEPALMAS 2009B: Depalmas A., *Il Bronzo Finale della Sardegna*, in Atti della XLIV Riunione Scientifica dell'Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Cagliari, Barumini, Sassari, 23-28 novembre 2009, vol. I - Relazioni generali, Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Firenze: pp. 141-159.

DEPALMAS 2014: Depalmas A., *Le navicelle*, in Moravetti A., Alba E., Foddai L. (a cura di), *Corpora delle Antichità della Sardegna, La Sardegna nuragica: storia e materiali*, Sassari: pp. 121-136

DEPALMAS-BAGELLA 2007: Depalmas A., Bagella S., *Nuove osservazioni su circoli di pietre e dolmen dell'areale Sardo-Corso*, in AAVV, *Patrimonio Archeologico ed Architettonico Sardo-Corso: Affinità e differenze* (p. 195-215). Sassari.

DEPALMAS-DEIANA 2011: Depalmas A., Deiana A., *La Fase finale della cultura di Monte Claro e il rapporto con i successivi aspetti culturali dell'età del Bronzo*, in *L'età del rame in Italia: atti della XLIII Riunione scientifica: dedicata a Gianni Bailo Modesti, 26-29 novembre 2008*, Bologna, Italia. Firenze, Istituto italiano di preistoria e protostoria: pp. 135-142.

DERUDAS 2023: Derudas P.M., *La necropoli di Mesu'e Montes*, in Tanda G., Doro L., Usai L., Buffoni F. (a cura di), (Candidatura UNESCO 2021) *Arte e architettura nella preistoria della Sardegna. Le domus de janas*, Condaghes, Cagliari: pp. 90-99.

DIARA 2013: Diara F., *Sperimentazioni di nuove tecniche fotogrammetriche di medio e basso costo applicate all'arheologia dell'architettura*, Conference: XXIX Convention of Studies of Brixen.

DI FILIPPO 2023: Di Filippo A., *Appunti di fotogrammetria sferica*, in *Quaderni di incontri sul disegno* 15.

DIRMINTI 2023: Dirminti E., *Tertenia e l'Ogliastra in età romana*, in Mancini P. (a cura di), *Sulle strade d'Ogliastra. Il complesso tardoantico e altomedievale di Fusti'e Carca a Tertenia, Taphros*, Olbia: pp. 35-40.

DORE 2003: Dore G., *I nuraghes a scala sussidiaria*, in *Sardegna Antica* C. M. 20-21: pp. 40-41.

D'ORIANO 2002: D'Oriano R., *Relitti di storia: lo scavo del porto di Olbia*, in Khanoussi M., Ruggeri P., Vismara C. (a cura di), *L'Africa romana: lo spazio marittimo del Mediterraneo occidentale: atti del XIV Convegno di studio, 7-10 dicembre 2000, Sassari, Italia, Carocci editore, Roma*: pp. 1249-1262.

D'ORIANO 2010: D'Oriano R., *Olbia greca: il contesto di Via Cavour*, in Arru M.G., Simona Campus, Cicilloni R., Ladogana R. (a cura di) *Ricerca e confronti 2010 ATTI Giornate di studio di archeologia e storia dell'arte a 20 anni dall'istituzione del Dipartimento di Scienze Archeologiche e Storico-artistiche dell'Università degli Studi di Cagliari (Cagliari, 1-5 marzo 2010), ArcheoArte. Rivista elettronica di Archeologia e Arte*: pp. 183-199.

DORO-CORRAINE 2023: Doro L., Corraire P., *La necropoli di Monte Siseri*, in Tanda G., Doro L., Usai L., Buffoni F. (a cura di), (Candidatura UNESCO 2021) *Arte e architettura nella preistoria della Sardegna. Le domus de janas, Condaghes, Cagliari*: pp. 74-81.

ES SEBAR ET ALII 2023: Es Sebar L., Lombardo L., Buscaglia P., Cavaleri T., Lo Giudice A., Re A., Borla M., Aicardi S., Grassini S., *3D Multispectral Imaging for Cultural Heritage Preservation: The Case Study of a Wooden Sculpture of the Museo Egizio di Torino*, in *Heritage 2023*: 2783 - 2795.

FABRIS ET ALII 2008: Fabris M., Achilli V., Boatto G., Bragagnolo D., Menin A., *Integrazione di metodologie di rilievo terrestre ad alta risoluzione per il rilievo di fossili*, Atti XII Conferenza Nazionale ASITA, L'Aquila, 21-24 ottobre 2008: pp. 1097 - 1102.

FADDA 1988: Fadda M.A., *La fonte sacra di Su Tempiesu*, *Sardegna Archeologica. Guide e Itinerari*, 8, Sassari.

FADDA 1999: Fadda M.A., *Su Tempiesu di Orune e il culto nuragico delle acque*, in *Archeologia Viva: per chi vive il passato in funzione del presente: mensile di archeologia, arte ed etnologia*, 74: pp. 78-83.

FADDA 2001: Fadda M.A., *I templi a Megaron della Sardegna: un esempio particolare nel territorio di Esterzili*, in Sanges M. (a cura di), *L'eredità del Sarcidano e della Barbagia di Seulo: patrimonio di conoscenza e di vita*, Cagliari: 156 – 158.

FADDA 2006: Fadda M.A., *Il Museo Archeologico Nazionale di Nuoro*, Sassari.

FADDA 2008: Fadda M.A., *Il complesso nuragico di Gremanu*, Collana Sardegna archeologica. Guide e itinerari 42, Sassari.

FADDA 2012: Fadda M.A., *Villagrande Strisaili: il villaggio santuario di S'Arcu 'e Is Forros*, Collana Sardegna archeologica. Guide e itinerari 48, Sassari.

FADDA 2013: Fadda M.A., *Nel segno dell'acqua. Santuari e bronzi votivi della Sardegna nuragica*, Sassari.

FADDA 2015: Fadda M.A., *Nurdole. Un nuraghe trasformato in tempio*, in Minoja M.E., Salis G., Usai L. (a cura di), *L'isola delle torri. Giovanni Lilliu e la Sardegna nuragica*, Catalogo della mostra (Cagliari, 15 marzo - 30 settembre 2014, Roma, 28 novembre 2014-7 aprile 2015, Milano, 6 maggio 2015-14 febbraio 2016), Sassari: pp. 325-329.

FADDA 2017: Fadda M.A., *I templi a megaron della Sardegna nuragica*, in Moravetti A., Melis P., Foddai L., Alba E. (a cura di) *La Sardegna nuragica: storia e monumenti*, Sassari: 223 – 251.

FADDA-POSI 2006: Fadda M.A., Posi N., *Il villaggio santuario di Romanzesu*, in *Sardegna Archeologica. Guide e Itinerari*, 39, Sassari.

FANDONIA 2012: Fundoni G., *Le ceramiche nuragiche nella Penisola Iberica e le relazioni tra la Sardegna e la Penisola Iberica nei primi secoli del I millennio a.C.*, in Luglié C., Cicilloni R. (a cura di), *La Preistoria e la Protostoria della Sardegna. Volume II – Comunicazioni, Atti della XLIV Riunione Scientifica dell'Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria*, Cagliari, Barumini, Sassari 23-28 novembre 2009), Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Firenze: pp. 1115-1120.

FAVRETTO-MAURO 2015: Favretto A., Mauro G., *Analisi esplorative delle preferenze dei visitatori di una manifestazione culturale in uno spazio urbano utilizzando il Balloon mapping e la statistica spaziale. Il caso di Trieste Next*, in Bollettino dell'Associazione Italiana di Cartografia 151, pp. 7-19.

FERRARESE CERUTI 1981A: Ferrarese Ceruti M.L., *La cultura del Vaso Campaniforme*, in Ichnussa. La Sardegna dalle origini all'età classica: pp. LV-LXV.

FERRARESE CERUTI 1981B: Ferrarese Ceruti M.L., *La cultura di Bonnanaro*, in Incussa. La Sardegna dalle origini all'età classica: pp. LXVII-LXXVII.

FERRARESE CERUTI 1982: Ferrarese Ceruti M.L., *Il complesso nuragico di Antigori (Sarroch)*, in Vagonetti L., a cura di, *Magna Grecia e mondo miceneo. Nuovi documenti*, Atti del XXI convegno di studi sulla Magna Grecia, Taranto: pp. 167-176.

FERRARESE CERUTI 1983: Ferrarese Ceruti M.L., *Antigori: la torre f del complesso nuragico di Antigori (Sarroch-Cagliari) - Nota preliminare*, in *Magna Grecia e mondo miceneo. Atti del Ventiduesimo convegno di studi sulla Magna Grecia*, Taranto 7-11 ottobre 1982: pp. 187-206.

FERRARESE CERUTI 1985: Ferrarese Ceruti M.L., *La Sardegna e il mondo miceneo*, in AA.VV., *Sardegna preistorica, Nuraghi a Milano*, Milano: pp. 245-254.

FERRARESE CERUTI 1987: Ferrarese Ceruti M.L., *Considerazioni sulla ceramica nuragica di Lipari*, in AA.VV., 1987, *La Sardegna nel Mediterraneo tra il secondo e il primo millennio a.C.*, Atti del II Convegno di Studi Un millennio di relazioni fra la Sardegna e i Paesi del Mediterraneo, Cagliari: pp. 431-442.

FERRARESE CERUTI 1988: Ferrarese Ceruti M.L., *Il campaniforme in Sardegna*, in *L'Età del Rame in Europa*, Atti del Congresso Internazionale (Viareggio, 15-18 ottobre 1987), *Rassegna di Archeologia*, 7, Firenze: pp. 456-460.

FERRARESE CERUTI 1989: Ferrarese Ceruti M.L., *L'età prenuragica. L'Eneolitico finale e la prima Età del Bronzo*, in Santoni V. (a cura di), Il museo archeologico nazionale di Cagliari: pp. 57-78.

FERRARESE CERUTI ET ALII 1987: Ferrarese Ceruti M.L., Vagonetti L., Lo Schiavo F., *Minoici, Micenei e Ciprioti in Sardegna alla luce delle più recenti scoperte*, in Balmuth M.S., a cura di, Nuragici Sardinia and the Micenean World, SSA III, BAR 387, Oxford: pp. 7-37.

FICARRA 2022: Ficarra S., Lauria G., *Gli Archivi Digitali e l'Antropologia Virtuale. Ricostruzione 3D di un cranio umano mediante la moderna tecnica della Fotogrammetria*, Archivio per l'Antropologia e la Etnologia - Vol. CLII: 117 – 130.

FIORILLO ET ALII 2016: Fiorillo F., Limongiello M., Fernandez-Palacios J.B., Barba S., *Documentazione dei paramenti della Villa di Giulia Felice a Pompei. Spazi Angusti e analisi geometrico-grafica dei rilievi*, Valenti G.M. (a cura di) in Prospettive architettoniche conservazione digitale, divulgazione e studio Volume III Tomo II: 425 - 436.

FIORINI ET ALII 2021: Fiorini A., Curci A., Spina Police E.E., Benazzi S., *Grotta di Luzzo C (Nardò-Lecce): risultati preliminari, strumenti e metodi dell'indagine archeologica*, in FOLDER 2019: pp. 440.

FOIS 2015: Fois A., *407. Acciarino di carro – 409. Statuetta di divinità*, in Minoja M., Salis G., Usai L. (a cura di), L'isola delle torri: Giovanni Lilliu e la Sardegna nuragica: Catalogo della Mostra: Cagliari, 15 marzo-30 settembre 2014; Roma, 28 novembre 2014-7 aprile 2015; Milano, 6 maggio 2015-14 febbraio 2016, catalogo: 468 – 469.

FORCI 2008: Forci A., *Note sul paesaggio archeologico del Gerrei: l'esempio di Silius tra bronzo medio e recente*, in La civiltà nuragica: nuove acquisizioni 2, Atti del Congresso, Senorbì, 14-16 dicembre 2000, Quartu Sant'Elena: 417-430.

FORCI-RALLI 1995: Forci A., Ralli R., *Ceramiche vascolari nuragiche in pasta grigia da S. Gemiliano di Sestu (Cagliari)*, QSACO Quaderni della Soprintendenza Archeologica di Cagliari e Oristano, 12: pp. 41-53.

FORTUNATI ET ALII 2018: Fortunati M., Zolfi L.M., Bishop J., de Rosa A., Malaspina F., Zanni S., *Applicazioni di Structure From Motion (SfM): Tecniche open source di rilievo per interventi archeologici d'emergenza*, in *Archeomatica*, 4, 2014: pp. 5 - 8.

FOSCHI NIEDDU 1986: Foschi Nieddu A., *La tomba I di Filigosa (Macomer-Nuoro). Alcune considerazioni sulla cultura di Abealzu-Filigosa nel contesto eneolitico della Sardegna*, Cooperativa grafica nuorese, Nuoro.

FURFARO 2022: Furfaro G., Tandu B., Fiorini G., Guerra F., *La fotogrammetria sferica per il rilievo del patrimonio storico-culturale: la necropoli di Anghelu Ruju*, in *Atti della Conferenza Nazionale di Geomatica e Informazione Geografica ASITA 2022*: pp. 261 - 272.

FUSCO ET ALII 2017: Fusco M., Valentini R., D'Andrea A., *Tecniche integrate per la documentazione tridimensionale del sito di Valle Giumentina (Abruzzo, Italia)*, in *Annali dell'Università degli Studi di Ferrara Museologia Scientifica e Naturalistica IV Incontro Annuale di Preistoria e Protostoria*, Ferrara, 7-8 febbraio 2018 a cura di Marta Arzarello, Federica Fontana, Marco Peresani, Carlo Peretto, Ursula Thun Hohenstein: pp. 74-77.

FUSSEL ET ALII 1986: Fussel J., Runquist D., Harrington J.A., *On Defining Remote Sensing*, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, Vol. 52, No.9, September 1986: 1507-1511.

GABRIELLI-PELOSO 2004: Gabrielli R., Peloso D., *Tecniche laser scanner per il rilievo dei beni culturali*, in *Geomedia*, 28: pp. 28-32.

GABRIELLI-PELOSO 2005: Gabrielli R., Peloso D., *Tecniche laser scanner per il rilievo dei beni culturali*, in *Archeologia e calcolatori*, 16: pp. 199-224.

GIACALONE 2015: Giacalone E., *Tutorial Zscan e Zmicro*, in *ISSUU*.

GIGLIO-BOSCO *ET ALII* 2022: Giglio M., Bosco A., Valentini R., Mattei C., Di Tano I., Cuomo M., Baiano F., *Nuove ricerche nel settore termale e del cd. vigneto della villa imperiale del Pausilypon di Napoli*, *Archeologie tra Oriente e Occidente*, 1: 23 – 41.

GIRARDEAU MONTAUT 2019: Girardeau Montaut D., *CloudComparePoint Cloud Processing Workshop*, PCP 2019 December 4-5, 2019, Stuttgart, Germania.

GIRARDI *ET ALII* 2007: Girardi S., Cavulli F., Voltolini F., Rizzi A., Remondino F., Pedrotti A., Gonzo L., *Laser scanner e fotografia digitale per la modellazione e l'analisi di siti archeologici: il caso di studio del riparo Gaban*, in *Atti XI Conferenza Nazionale ASITA, Centro Congressi Lingotto, Torino 6 - 9 novembre 2007*: pp. 1-6.

GIUFFRIDA *ET ALII* 2007: Giuffrida A., Liuzzo M., Santagati C., *Il laser scanner per il rilevamento delle opere archeologiche. Le terme dell'Indirizzo a Catania*, in *Il Rilievo dei Beni Architettonici ed Archeologici. Giornate di studio su Le nuove frontiere del rilevamento digitale Esperienze del passato e prospettive. Atti Convegno 2005*: pp. 47-60.

GODIN *ET ALII* 2000: Godin G., Cournoyer L., Domey J., Taylor J., *Three-dimensional recording of objects and sites using laser range imaging*, in *Quaderni del Centro di Ricerche Informatiche per i Beni Culturali della Scuola Normale Superiore di Pisa*, 10: 139-150.

GUALANDI 2010: Gualandi L., *Il GPS nello studio tecnico professionale*, Milano.

GUIDO 1991: Guido F., *Scavi nella fortificazione punica di S. Antine di Genoni (Nuoro)*, in *Atti del Congresso Internazionale di Studi Fenici e Punici (Roma, 9-14 novembre 1987)*, III, Roma: pp. 931-940.

GUIDO *ET ALII* 2015: Guido F., Fois A., Merella S., *Il pozzo di Santu Antine a Genoni*, in Minoja M., Salis G., Usai L. (a cura di), *L'isola delle torri: Giovanni Lilliu e la Sardegna nuragica: Catalogo della Mostra: Cagliari, 15 marzo - 30 settembre 2014; Roma, 28 novembre 2014-7 aprile 2015; Milano, 6 maggio 2015-14 febbraio 2016*: pp. 339 – 343.

GUILAINE 1996: Guilaine J., *Proto-mégalithisme, rites funéraires et mobiliers de prestige néolithiques en Méditerranée occidentale*, in M. A. Querol, T. Chapa (a cura di), *Homenaje al profesor Manuel Fernández-Miranda (= Complutum, n. Extra, 6, I)*, Madrid 1996: 123-14.

GUILAINE 1998: Guilaine J., *Sépultures d'occident et génèses des mégalithismes 9000-3500 ans avant notre ère*, Parigi.

HUGENHOLTZ ET ALII 2013: Hugenholtz C. H., Whitehead K., Barchyn T. E., Brown O., Moorman B. J., LeClair A., Hamilton T., Riddell K., *Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): feature detection and accuracy assesament of a photogrammetrically-derived digital terrain model*, in *Geomorphology*, 194: pp. 16-24.

IALONGO 2011: Ialongo N., *Il santuario nuragico di Monte Sant'Antonio di Siligo (SS). Studio analitico dei complessi cultuali della Sardegna protostorica*, Tesi di dottorato A.A. 2010-2011.

IBBA 2010: Ibba A., *I Vandali in Sardegna*, in *Lingua et ingenium. Studi su Fulgenzio da Ruspe e il suo contesto*, Sandhi Editore, Ortacesus: pp. 385-426.

JOHNSON 1978: Johnson G.W., *Mapping an Ancient Trade Route with Balloon Photography*, in *Inter-Congress Symposium on New Technology for Mapping*, Ottawa, Ontario, Canada, October 2-6, 1978: pp. 1489-1493.

JONES 1980: Jones G. D. B., *Il Tavoliere romano: l'agricoltura romana attraverso l'aerofotografia e lo scavo*, in *Archeologia classica: rivista del dipartimento di scienze storiche archeologiche e antropologiche dell'antichità: XXXII*.

LAEFER ET ALII 2011: Laefer D.F., Trohung Hong L., Fitzgerald M., *Processing of Terrestrial Laser Scanning Point Cloud Data for Computational Modelling of Building Facades*, in *Terrestrial LiDAR to solid models*.

LAI 2009: Lai L., *Il clima nella Sardegna preistorica e protostorica: problemi e nuove prospettive*, in *La Preistoria e la Protostoria della Sardegna, Atti della*

XLIV Riunione Scientifica dell'IIPP (Cagliari- Barumini-Sassari, 23-28 novembre 2009), I, Firenze: pp. 313-324.

LEONARDI-PENELLO 1991: Leonardi G., Penello G., *Il disegno archeologico della ceramica e altri problemi*, Torino.

LEONELLI 2012: Leonelli V., *Il complesso culturale di Su Monte, Sorradile*, in Campus F., Leonelli V. (a cura di) *Simbolo di un simbolo: i modelli di nuraghe*. Ittireddu: Museo civico archeologico ed etnografico di Ittireddu; Monteriggioni: pp. 253-256.

LEVI 1937: Levi D., *Scavi e ricerche archeologiche della R. Soprintendenza alle opere di antichità e d'arte della Sardegna (1935-1937)*, «BdA», a. 1937, pp. 193-210.

LEVOY ET ALII 2000: Levoy M., Pulli K., Curless B., Rusinkiewicz S., Koller D., Pereira L., Ginzton M., Anderson S., Davis J., Ginsberg J., Shade J., Fulk D., *The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues*, in *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, pp. 131-144.

LILLIU 1966: Lilliu G., *Sculture della Sardegna Nuragica*, Cagliari.

LILLIU 1968: Lilliu G., *Il dolmen di Motorra (Dorgali-Nuoro)*, in *Studi Sardi*, XX (1966-1967): pp. 74-128.

LILLIU 1988: Lilliu G., *La civiltà dei Sardi dal paleolitico all'età dei nuraghi*, Torino.

LILLIU 1997: Lilliu G., *La grande statuaria della Sardegna Nuragica*, ML IX – CCCXCIV: pp. 283-385.

LILLIU 2003: Lilliu G., *La civiltà dei sardi: dal Paleolitico all'età dei nuraghi*, Torino.

LILLIU 2010: Lilliu G., *La tomba di giganti di Bidistili e i templi a "megaron" della Sardegna Nuragica*, in *Sardegna Archeologica. Scavi e Ricerche*, 4, Sassari.

LILLIU- FERRARESE CERUTI 1960: Lilliu G., Ferrarese Ceruti M.L., *La facies nuragica di Monte Claro*, in Studi Sardi, XVI (1957-1959): pp. 3-266.

LO BRUTTO-SPERA 2010: Lo Brutto M., Spera M. G., *Image-based and range-based 3d modelling of archaeological cultural heritage: the telamon of the temple of Olympian Zeus in Agrigento (Italy)*, The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences · January 2011: 512 – 522.

LOPEZ ET ALII 2005: López P., López Sáez J.A., Macías R. 2, *Estudio de la paleovegetación de algunos yacimientos de la Edad del Bronce en el SE de Cerdeña*, in Pranemuru: pp. 91-105.

LOPEZ-MULERO-PÁZMÁNY 2019: Lopez J. J., Mulero-Pázmány M., *Drones for Conservation in Protected Areas: Present and Future*, in Drones, 3 (1) 10.

LO SCHIAVO 2014: Lo Schiavo F., *La produzione metallurgica*, in Moravetti A., Alba E., Foddai L. (a cura di), *Corpora delle Antichità della Sardegna, La Sardegna nuragica: storia e materiali*, Sassari: pp. 93-120.

LO SCHIAVO ET ALII 2004: Lo Schiavo F., Antona A., Bafico S., Campus F., Cossu T., Fonzo O., Forci A., Garibaldi P., Isetti E., Lanza S., Leonelli V., Perra M., Puddu M.G., Relli R., Rossi G., Sanges M., Usai A., Usai L., *Articolazioni cronologiche e differenziazioni locali. La metallurgia*, in Cocchi Genick (a cura di) *L'età del bronzo recente in Italia*, Atti del Congresso nazionale, Viareggio: pp. 357-382.

LO SCHIAVO-SANGES 1994: Lo Schiavo F., Sanges M., *Il nuraghe Arrubiu di Orroli*, in *Sardegna Archeologica. Guide e itinerari 22*, Sassari.

LUGLI 1939: Lugli G., *Saggi di esplorazione archeologica a mezzo della topografia aerea*, Roma 1939.

LUGLIÉ 2005: Luglié C., *Analisi archeometriche preliminari su elementi ceramici del Bronzo Recente dal Campidano meridionale*, in AA. VV., 2005, *La*

Civiltà nuragica – Nuove acquisizioni 1, Atti del Congresso, Senorbì, 14-16 dicembre 2000, Quartu Sant’Elena: pp. 155-166, 227-231.

MANCINI 2015: Mancini P., *Il santuario di Sos Nurattolos*, in Mancini P. (a cura di), *Alà dei sardi. Il patrimonio archeologico*, Olbia: pp. 106-119.

MANCINI 2023: Mancini P., *L’indagine del sito archeologico di Fusti’e Carca*, in Mancini P. (a cura di), *Sulle strade d’Ogliastra. Il complesso tardoantico e altomedievale di Fusti’e Carca a Tertenia, Taphros*, Olbia: pp. 45-112.

MANUNZA 2005: Manunza M.R., *La vita a Soleminis nella Preistoria*, in Manunza M.R., a cura di, *Cuccuru Cresia Arta. Indagini archeologiche a Soleminis, Grafica del Parteolla, Dolianova*: pp. 27-39.

MANUNZA 2008: Manunza M.R., *Funtana Coberta, tempio nuragico a Ballao nel Gerrei*, Cagliari.

MANUNZA 2013: MANUNZA M.R., *Corredi funerari di culturamonte chiaro a ganni (quartucciu – ca). Notizia preliminare*, in *Quaderni*, 24: pp. 39-76.

MANUNZA 2015: Manunza M.R., *L’area archeologica di Funtana Coberta di Ballao*, in Minoja M.E., Salis G., Usai L. (a cura di), *L’isola delle torri. Giovanni Lilliu e la Sardegna nuragica, Catalogo della mostra (Cagliari, 15 marzo - 30 settembre 2014, Roma, 28 novembre 2014-7 aprile 2015, Milano, 6 maggio 2015-14 febbraio 2016)*, Sassari: pp. 277-280.

MANUNZA ET ALII 2014: Manunza M.R., Fenu P., Nieddu F., *Approcci allo studio delle architetture domestiche di facies Monte Claro: l’abitato del lago di Monte Pranu- Tratalias/Villaperuccio (CI)*, in *Quaderni CA*, 25: pp. 33-55.

MARCIALIS 2015: Marcialis P., *Il rilievo delle domus de janas con 3D laser scanner*, in Tanda G. (ed.) *Cultura visuale preistorica: le domus de janas: progetto di ricerca di base Vol. 2: Nuove tecniche di documentazione e di analisi per una ricostruzione delle società dalla fine del 5. al 3. millennio a. C.*: pp. 53 - 66.

MARCIALIS 2020: Marcialis P., *Il circolo megalitico di Sa Ortija-Chiaramonti (SS)*, Convegno internazionale La Sardegna e il Mediterraneo: dall'archeologia alla società. Studi e ricerche in memoria di Ercole Contu, sezione Poster, Sassari, Aula Magna dell'Università, 17-18 gennaio 2020.

MARCIALIS-DE MARTINI 2024A: Marcialis P., de Martini M.G., *Circoli e recinti megalitici in Sardegna*, in *Arte e architettura nella preistoria della Sardegna. Le domus de janas*, Dossier di candidatura, Allegato 3 – Approfondimenti: pp. 139-156

MARCIALIS-DE MARTINI 2024B: Marcialis P., de Martini M.G., *Recinti e circoli di pietre della Sardegna preistorica e protostorica. Metodologia di un'indagine*, Layers. Archeologia Territorio Contesti, (9): pp.

MARCIALIS-ORGIANA 2017: Marcialis P., Orgiana A., Aggiornamento del censimento archeologico del territorio di Nurri, in Paglietti G., Porcedda F., Doro L. (a cura di), *LAYERS Archeologia territorio contesti*, Supplemento al n. 2 2017, *Notizie e scavi della Sardegna nuragica*, I Congresso regionale, Serri, 20 – 22 aprile 2017, Abstract book, Poster: pp. 141 – 142.

MARRAS 2023A: Marras G., *Tertenia e l'Ogliastra nell'altomedioevo*, in Mancini P. (a cura di), *Sulle strade d'Ogliastra. Il complesso tardoantico e altomedievale di Fusti'e Carca a Tertenia*, Taphros, Olbia: pp. 41-44.

MARINI 1998: Marini A., *Applicazioni GIS per la conoscenza e la valorizzazione dei beni culturali*, in *Geografia e didattica: Sardegna: beni naturali e culturali per la valorizzazione della regione: atti del 39° Convegno nazionale: corso di aggiornamento scientifico e didattico*, Quartu S. Elena, Cagliari, 18-22 ottobre 1996.

MARRAS 2023B: Marras G., *La necropoli di Mandra Antine*, in Tanda G., Doro L., Usai L., Buffoni F. (a cura di), (Candidatura UNESCO 2021) *Arte e architettura nella preistoria della Sardegna. Le domus de janas*, Condaghes, Cagliari: pp. 60-67.

MARTORELLA 2022: Martorella F., *Granai e magazzini dell'Africa romana. Architetture e sistemi di conservazione delle derrate*, in Papi E. (a cura di) *Mediterranean Archaeology Studies* 4.

MARTORELLI 2017: Martorelli R., *Le città in Sardegna fra tardoantico ed altomedioevo*, in Angiolillo S., Martorelli R., Giuman M., Corda A.M., Artizzu D. (a cura di), *La Sardegna romana e altomedievale. Storia e materiali. Corpora delle Antichità della Sardegna*: pp. 265-278.

MASSETTI 2013: Massetti S., *L'area archeologica di Janna 'e Pruna e l'Antiquarium Comunale di Irgoli*, *Collana Sardegna archeologica. Guide e itinerari*, 51, Sassari.

MASTINO 2009: Mastino A., *Storia della Sardegna Antica*, Il Maestrale, Nuoro.

MASTINO-RUGGERI 2000: Mastino A., Ruggeri P., *La romanizzazione dell'Ogliastra*, in Meloni M.G., Nocco S. (a cura di), *Ogliastra. Identità storica di una provincia*, *Atti del convegno di studi, Jerzu-Lanusei-Arzana-Tortolì*, 23-25 gennaio 1997, Senorbì: pp. 151-189.

MAURO 2014: Mauro G., *Strumenti per una cartografia 'attiva': il balloon mapping. Limiti e potenzialità in un progetto di ricerca a Trieste*, in *Bollettino dell'Associazione Italiana di Cartografia* 151, pp. 4-16.

MAURO 2015: Mauro G., *Balloon Mapping come metodologia low-cost per ricerche geografiche e archeologiche*, in *Bollettino dell'Associazione Italiana di Cartografia* 155: pp. 20-35.

MAXIA-FADDA 1974: Maxia C., Fadda L., *Primo esempio di un circolo megalitico nuragico a caratteristiche nuove e con un ara solare (località Sa Codina de S'Ipreddosu, Norbello)*, in *Frontiera: rivista mensile illustrata di cultura, arte, scienza, politica, umanità*, 1, Cagliari: 307-310.

MEDRI 2003: Medri M., *Manuale di rilievo archeologico*, Bari.

MELI ET ALII 2004: Meli P., Bennardo C., Boselli G., *L'utilizzo del Laser Scanner 3D in Archeologia*, in *Geomedia*, 4: pp. 36-38.

MELIS 2000: Melis M.G., *L'età del Rame in Sardegna: origine ed evoluzione degli aspetti autoctoni*, Soter, Villanova Monteleone 2000.

MELIS 2001: MELIS P., *Gli scavi nella necropoli ipogeica di Sa Figu a Ittiri : campagna 2001*, in Ittiri città 1.

MELIS 2004: MELIS P., *Gli scavi nel "circolo megalitico" di Sa Figu (Ittiri, Sassari)*, in *Sardinia, Corsica et Baleares antiquae: international journal of archaeology*, Pisa, 29-42.

MELIS 2005: Melis P., *Nuovi dati sull'architettura dei nuraghi a "tholos"*, in AA. VV., 2005, *La Civiltà nuragica – Nuove acquisizioni 1*, Atti del Congresso, Senorbì, 14-16 dicembre 2000, Quartu Sant'Elena: pp. 27 - 43.

MELIS 2007: Melis M.G., *L'inizio dell'età del Rame in Sardegna. Nuovi contributi cronologici*, in *Rivista di Scienze Preistoriche - LVII – 2007*: pp. 185-200

MELIS 2009: Melis M.G., *L'Eneolitico antico, medio ed evoluto in Sardegna: dalla fine dell'Ozieri all'Abealzu*, in Luglié C., Cicilloni R. (a cura di), *La Preistoria e la Protostoria della Sardegna*, in *Atti della XLIV Riunione Scientifica dell'Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria*, Cagliari, Barumini, Sassari, 23-28 novembre 2009, vol. I - Relazioni generali, Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Firenze: pp. 81-95.

MELIS 2012: Melis M.G., *Archeologia degli insediamenti eneolitici della Sardegna*, in Luglié C., Cicilloni R. (a cura di), *La Preistoria e la Protostoria della Sardegna. Volume II – Comunicazioni*, *Atti della XLIV Riunione Scientifica dell'Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria*, Cagliari, Barumini, Sassari 23-28 novembre 2009, Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Firenze: pp. 545-550.

MELIS 2014A: Melis M.G., *Problemi di cronologia insulare. La Sardegna tra il IV e il III Millennio BC*, in *Cronologia assoluta e relativa dell'età del Rame in Italia*, Incontro di Studi, Università di Verona, Verona, 25 giugno 2013, QuiEdid Verona, pp: 197-211.

MELIS 2014B: Melis M.G., *Lo strumentario tessile della Preistoria. I pesi da telaio della Sardegna*, in Quaderni del LaPArS 1, Sassari.

MELIS 2017A: Melis M.G., *L'eredità del Neolitico. La Sardegna Tra il IV e il III millennio a.C.*, in Moravetti A., Alba L., Foddai L. (a cura di), *La Sardegna Nuragica. Storia e materiali. Corpora delle Antichità della Sardegna*, Sassari: pp. 82 – 95.

MELIS 2017B: Melis P., *I nuraghi*, in Moravetti A., Alba L., Foddai L. (a cura di), *La Sardegna Nuragica. Storia e materiali. Corpora delle Antichità della Sardegna*, Sassari: pp. 29-54.

MELIS 2017C: Melis P., *La religiosità prenuragica*, in Moravetti A., Alba L., Foddai L. (a cura di), *La Sardegna Nuragica. Storia e materiali. Corpora delle Antichità della Sardegna*, Sassari: pp 145-158

MELIS 2018: Melis M.G., *Modelli di sfruttamento e circolazione delle materie prime nel Mediterraneo Occidentale durante il IV Millennio BC. Idati della Sardegna*, in Quaderni del LaPArS 3, *La Préhistoire e la Protohistoire des îles de Méditerranée Occidentale. Matières premières, circulation, expérimentation et traditions techniques*, Atti del Workshop, Corte – Université de Corse – 26 – 27 settembre 2016: pp. 99-124.

MELIS 2023: Melis P., *La domus de janas della Rocca dell'Elefante*, in Tanda G., Doro L., Usai L., Buffoni F. (a cura di), (Candidatura UNESCO 2021) *Arte e architettura nella preistoria della Sardegna. Le domus de janas*, Condaghes, Cagliari: pp. 136-139.

MELIS ET ALII 2012: Melis M. G., Cappai R., Manca L., Piras S., *The beginning of metallurgic production and the socioeconomic transformations of the Sardinian Eneolithic*, in Cristiani, E., Conati-Barbaro, C. and Lemorini C. (a cura di), *Social, Economic and Symbolic Perspectives at the Dawn of Metal Production*, (BAR International S 2372): pp. 13-32.

MELIS-PIRAS 2012: MELIS M.G., PIRAS S., *L'analisi morfo-tecnologica della ceramica come indicatore delle trasformazioni tra l'Ozieri "classico" e "finale"*, in Luglié C., Cicilloni R. (a cura di), *La Preistoria e la Protostoria della*

Sardegna. Volume II – Comunicazioni, Atti della XLIV Riunione Scientifica dell'Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Cagliari, Barumini, Sassari 23-28 novembre 2009, Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Firenze: pp. 563-569.

MELONI 1975: Meloni P., *La Sardegna romana*, Chiarella, Sassari, 1975.

MENCI ET ALII 2007: Menci L., Nex F., Rinaudo F., *Zscan Menci Software: un nuovo strumento per le elaborazioni fotogrammetriche multimmagie*, Atti 11° Conferenza Nazionale ASITA, Centro Congressi Lingotto, Torino 6 - 9 novembre 2007.

MERELLA 2015: Merella S., *410. Bronzetto orante*, in Minoja M., Salis G., Usai L., *L'isola delle torri: Giovanni Lilliu e la Sardegna nuragica: Catalogo della Mostra: Cagliari, 15 marzo-30 settembre 2014; Roma, 28 novembre 2014-7 aprile 2015; Milano, 6 maggio 2015-14 febbraio 2016*: p. 469.

MERLO ET ALII 2015: Merlo A., Aliperta A., Montuori R., *Strumenti e metodi per la documentazione digitale degli scavi archeologici: La Blanca (Petén - Guatemala)*, in RESTAURO ARCHEOLOGICO Conoscenza, conservazione e valorizzazione del patrimonio architettonico d'interesse archeologico e di quello allo stato di rudere Rivista del Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze, pp. 26-47.

MINUCCI 2018: Minucci E., *APR e droni nella moderna ricerca archeologica: un primo approccio*, in Newsletter di Archeologia CISA, Volume 9, 2018: pp. 91-114.

MODÉRAN 2003: Modéran Y., *Une guerre de religion: les deux églises d'Afrique à l'époque Vandale*, in *Antiquité Tardive*, 11: pp. 21-44.

MONTAGNARI KOKELJ 2015: Montagnari Kokelj M., *Balloon Mapping, droni e archeologia: casi studio in Friuli Venezia-Giulia (NE Italia)*, in Bollettino dell'Associazione Italiana di Cartografia 155: pp. 20-35.

MORAVETTI 1977: Moravetti A., *Nuove scoperte nel villaggio nuragico di Palmavera (Alghero-Sassari)*, in *Rivista di Scienze Preistoriche* - XXXII 1 - 2: pp. 277-281.

MORAVETTI 1979: Moravetti A., *Monte Osoni (Castelsardo, Prov. di Sassari)*, in *Rivista di scienze preistoriche*, v.34: n.1, Firenze: pp. 332-333.

MORAVETTI 2000A: Moravetti A., *Muraglie megalitiche e recinti nella Sardegna Prenuragica*, in, Balmuth M., Tykot R., a cura di, *Sardinian and Aegean Chronology, towards the resolution of relative and absolute dating in the Mediterranean*, Oxford, pp. 161- 177.

MORAVETTI 2000B: Moravetti A., *Il complesso prenuragico di Monte Baranta, Sassari*.

MORAVETTI 2004: Moravetti A., *Monte Baranta e la cultura di Monte Claro, Sassari*.

MORAVETTI 2009: Moravetti A., *La cultura di Monte Claro e del Vaso Campaniforme*, Atti della XLIV Riunione Scientifica dell'IIPP, *La Preistoria e la Protostoria della Sardegna (Cagliari- Barumini-Sassari, 23-28 novembre 2009)*, I, Firenze: pp. 97-109.

MORAVETTI 2017: Moravetti A., *Sulla cultura di Monte Claro*, in *Storia, materiali, monumenti*, in A. Moravetti, P. Melis, L. Foddai, E. Alba (a cura di), *La Sardegna preistorica. Storia, materiali, monumenti. Corpora delle Antichità della Sardegna*: pp. 179-202.

MOSCATI 1980: Moscati S., *Il mondo punico*, Roma.

NANNINI 2015: Nannini P., *La fotografia aerea da aquilone per l'archeologia*, in *Archeologia aerea, Studi di Aerotopografia Archeologica*, 9.15: 24-39.

NIEDDU 2014: Nieddu F., *Approcci allo studio delle architetture domestiche di facies Monte Claro: l'abitato del lago di Monte Pranu - Tratalias/Villaperuccio (CI)*, in *Qaderni*, 25, pp. 33-55.

NIOI 2007: Nioi O., *Logus. Microtoponimi di Nurri*, Selargius.

OLIVIERO *ET ALII* 2006: Oliviero C., Parente C., Santamaria R., *La Cartografia in rete e nelle applicazioni WEBGIS*, Atti X Conferenza ASITA, Bolzano, 14-17 novembre 2006.

PAGLIETTI 2015: Paglietti G., *Dal pozzo sacro al pozzo sacro. Riflessioni sulla cronologia del tempio a pozzo isodomo di Santa Vittoria di Serri*, in Canu N., Cicilloni R. (a cura di), *Il santuario di Santa Vittoria di Serri tra archeologia del passato e archeologia del futuro*, Roma: pp. 283-292.

PAGLIETTI 2023: Paglietti G., *La necropoli di Montessu*, in Tanda G., Doro L., Usai L., Buffoni F. (a cura di), (Candidatura UNESCO 2021) *Arte e architettura nella preistoria della Sardegna. Le domus de janas*, Condaghes, Cagliari: pp. 256-263.

PANI ERMINI 1988: Pani Ermini L., *La storia dell'altomedioevo in Sardegna alla luce dell'archeologia*, in Francovich R., Noyé G. (a cura di), *La storia dell'Alto Medioevo italiano (VI-X secolo) alla luce dell'archeologia. Convegno internazionale (Siena, 2-6 dicembre 1992)*, Firenze, All'Insegna del Giglio, Biblioteca di Archeologia Medievale 11: pp. 387-401.

PELOSO-GABRIELLI 2004: Peloso D., Gabrielli R., *Tecniche Laser Scanner per il rilievo dei Beni Culturali*, in *Rivista Geomedia*, 3: pp. 28 - 32.

PERIPIMENO 2009: Peripimeno M., 2009, *Documentazione 3D dello scavo archeologico: prime conclusioni*, in *Atti del V Congresso Nazionale di Archeologia Medievale*. Palazzo della Dogana, Salone del Tribunale (Foggia); Palazzo dei Celestii, Auditorium (Manfredonia); 30 settembre - 3 ottobre 2009, Firenze: pp. 63 - 67.

PERIPIMENO-SALVADORI 2003A; Peripimeno M., Salvadori F., *Nuovi percorsi di documentazione archeologica per mezzo di uno scanner 3D*, in *Atti Convegno internazionale della ceramica / Centro ligure per la storia della ceramica*, Savona: pp. 195 - 200.

PERIPIMENO-SALVADORI 2003B; Peripimeno M., Salvadori F., *Sperimentazione di uno scanner laser 3d nella documentazione dei reperti archeologici*, in Atti del Congresso nazionale di archeologia medievale: Castello di Salerno, Complesso di Santa Sofia, Salerno, 2-5 ottobre 2003: pp. 101-114.

PERONI 1996: Peroni R., *L'Italia alle soglie della storia*, Bari-Roma.

PERRA 2003: Perra M., *L'età del Bronzo finale: la "bella età" del nuraghe Arrubiu e la ricchezza delle genti di Pran'e Muru*, in *Nuraghe Arrubiu*: pp. 77-102.

PERRA 2012: Perra C., *Evidenze di un particolare luogo di culto nella fortezza orientalizzante del nuraghe Sirai a Carbonia*, in *La vie, la religion et la mort dans l'univers phénico-punique*, «VIIème Congrès international des études phénicienne et punique» (Hammamet, 10-14 novembre 2009).

PERRA 2016: Perra M., *Tempi che cambiano. Luoghi che si trasformano: i mutamenti dei nuraghe tra l'età del Bronzo e il Primo Ferro*, *Layers 1*: pp. 371-381.

PICCARRETA 1987: Piccarreta F., *Manuale di fotografia aerea: uso archeologico*, Roma.

PICCARRETA 1994: Piccarreta F., *Manuale di fotografia aerea: uso archeologico*, Roma.

PICCARRETA 2000: Piccarreta F., *Manuale di aerofotografia archeologica: metodologia, tecniche e applicazioni*, Bari.

PIETRA 2004: Pietra G., *I Vandali in Sardegna: nuove acquisizioni dai relitti del porto di Olbia*, in Akerraz A., Ruggeri P., Siraj A., Vismara C. (a cura di), *L'Africa romana XVI: mobilità delle persone e dei popoli, dinamiche migratorie, emigrazioni ed immigrazioni nelle province occidentali dell'Impero Romano*, Atti del XVI convegno di studio, Rabat, 15-19 dicembre 2004, Carocci, Roma, Vol. 2: pp. 1307-1320.

PITZALIS 2003: Pitzalis R., *La progettazione e le metodiche costruttive: alcune ipotesi*, in Cossu, Campus, Leonelli, Perra, Sanges (a cura di), *La vita nel nuraghe Arrubiu*, Quartu Sant'Elena: pp. 135-140.

PROVERBIO-CALLEDDA 2000: *Il circolo megalitico (cromlech) di Laconi: allineamenti d'interesse archeoastronomico*, in *L'uomo antico e il cosmo: 3. Convegno internazionale di archeologia e astronomia: Roma, 15-16 maggio 2000*, Roma: 53-66.

PUDDU-PALLAVER 1987: Puddu R., Pallaver L., 1987, *Giacomo Boni e le applicazioni della fotografia*, in *Fotologia*, 8: 31-36.

RADCLIFFE 2006: Radcliffe F.F., 2006, *Paesaggi sepolti in Daunia. John Bradford e la ricerca archeologica dal cielo 1945-1957*, Foggia.

RAGUCCI-USAI 1999: Ragucci G., Usai E. 1994-1998 (1999), *Nuovi contributi allo studio della Marmilla prenuragica: la tomba di Scaba 'e Arriu - Siddi (CA)*, *Studi Sardi*, XXXI: pp. 111-196.

RAOULT ET ALII 2018; Raoult V., Tosetto L., Williamson J. E., *Drone-Based High-Resolution Tracking of Aquatic Vertebrates*, in *Drones*, 2 (4), 37.

RELLI 1994: Relli R., *La torre C del complesso nuragico di Antigori (Sarroch): seconda nota allo scavo del vano superiore*, in *QSACO Quaderni della Soprintendenza Archeologica di Cagliari e Oristano*, 11: pp. 41-72.

RILEY 1980: Riley, D.N., *Factors in the development of crop marks*, in *Aerial Archaeology* 4: pp. 28-32

RILEY 1992: Riley D.N., *New aerial reconnaissance in Apulia*, *Papers of the British School at Rome*, n. 60: pp. 291-307.

ROSACE ET ALII 2021: Rosace G., Palucci R., Arrigo R., Malucelli G., *Studio e caratterizzazione di polimeri da fonti rinnovabili per stampa 3D*, in *AICING 2021: atti del convegno*: pp. 147-148.

ROWLAND 1981: Rowland R.J., *I ritrovamenti romani in Sardegna*, Roma.

RUSSO ET ALII 2011: Russo M., Guidi G., Remondino F., *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, in *Archeologia e Calcolatori*, 22: pp. 169 - 198.

RUTTER 2006: Rutter J.B. 2006, *Ceramic Imports of the Neopalatial and Later Bronze Age Eras*, in Shaw J.W. e Shaw M.C., eds., *Kommos V. h e Monumental Minoan Buildings at Kommos*, Princeton: pp. 646-688.

SALIS 2008: Salis G., *L'insula di Sa Sedda 'e Sos Carros (Oliena): la campagna 2006-2007 e i nuovi materiali*, in Fadda M.A. (a cura di), *Una Comunità Montana per la valorizzazione del Patrimonio Archeologico del Nuorese*, Cagliari.: pp. 147-189.

SALIS 2015: Salis G., *Il tempio circolare nel complesso archeologico di Sa Carcaredda a Villagrande Strisaili*, in Minoja M.E., Salis G., Usai L. (a cura di), *L'isola delle torri. Giovanni Lilliu e la Sardegna nuragica*, Catalogo della mostra (Cagliari, 15 marzo -30 settembre 2014, Roma, 28 novembre 2014-7 aprile 2015, Milano, 6 maggio 2015-14 febbraio 2016), Sassari: pp. 281-286.

SALIS 2017: Salis G., *Pozzi sacri, fonti e rotonde*, in A. Moravetti, P. Melis, L. Foddai, E. Alba (a cura di), *La Sardegna nuragica. Storia e monumenti. Corpora delle Antichità della Sardegna*: pp. 253-276.

SALIS 2018: Salis G., *La fonte di Su Tempiesu di Orune*, in *Il tempo dei nuraghi: la Sardegna dal 18. all'8. secolo a.C.*: pp. 258-261.

SALVADORI 2003: Salvadori F., *Three-Dimensional Scanning Techniques Applied to 3D Modeling of Pottery Finds*, in *Archäologie und Computer, Workshop 7*, Vienna 20-22 Novembre 2002.

SANTONI 1977: Santoni V., *Notiziario – Sardegna*, in *Rivista di Scienze Preistoriche* XXXII, 1-2: pp. 350-357.

SANTONI 1982: Santoni V., *Cabras-Cuccuru S'Arriu*, in *Rivista di Studi Fenici*, X, 1: pp. 103-110.

SANTONI 1989A: Santoni V., *Cuccuru S'Arriu- Cabras. Il sito di cultura San Michele di Ozieri. Dati preliminari*, in *La Cultura di Ozieri*, a cura di Dettori Campus L. (ed). Problematiche e nuove acquisizioni, Il torchietto editore, Ozieri: pp. 169-200.

SANTONI 1989B: Santoni V., *L'Età prenuragica: il Neolitico e l'Eneolitico*. In *Il museo archeologico di Cagliari*. Richiedere prestito InventarioLC 493 CollocazioneSARDEGNA 937.9 MUSAND Note1 v., ex inv. 2980 LACONI

SANTONI 1990: Santoni V., *I templi di età nuragica*, in *La civiltà nuragica*: pp. 169- 193.

SANTONI 1992: Santoni V., *Nuraghe Piscu di Suelli: documenti materiali del bronzo medio-recente*, in AA.VV., *La Sardegna nel Mediterraneo tra il Bronzo medio e il Bronzo recente (XVI-XIII sec. a.C.)*, Atti del III Convegno di Studi Un millennio di relazioni fra la Sardegna e i Paesi del Mediterraneo, Cagliari.: pp. 167-185.

SANTONI 2015: Santoni V., *Il santuario di Su Monte di Sorradile*, in Minoja M.E., Salis G., Usai L. (a cura di), *L'isola delle torri. Giovanni Lilliu e la Sardegna nuragica*, Catalogo della mostra (Cagliari, 15 marzo - 30 settembre 2014, Roma, 28 novembre 2014-7 aprile 2015, Milano, 6 maggio 2015-14 febbraio 2016), Sassari: pp. 287-292.

SANTONI-BACCO 2008: Santoni V., Bacco G., *Il Bronzo Recente e Finale di Su Monte - Sorradile (Oristano)*, in AA. VV., 2008, *La Civiltà nuragica – Nuove acquisizioni 2*, Atti del Congresso, Senorbì, 14-16 dicembre 2000, Quartu Sant'Elena: pp. 543-656.

SCHMIEDT 1964: Schmiedt G., *Atlante aerofotografico delle sedi umane in Italia: parte I, l'utilizzazione delle fotografie aeree nello studio degli insediamenti*, IGM, Firenze.

SCHMIEDT 1965: Schmiedt G., *Contributo della fotointerpretazione alla ricostruzione del paesaggio agrario altomedievale in Italia*, in Atti della XIII settimana di studi del CISAM, Spoleto: pp. 773-837.

SCHMIEDT 1965-1967: Schmiedt G., *Recenti applicazioni della fotografia aerea in ricerche di Topografia Antica e Medievale*, in Atti dell'Accademia Petrarca di Arezzo.

SCHMIEDT 1967: Schmiedt G., *Le fortificazioni altomedievali in Italia viste dall'aereo*, in Atti della XV settimana di studi del CISAM, Spoleto: pp. 860-927.

SCHMIEDT 1970: Schmiedt G., *Atlante aerofotografico delle sedi umane in Italia: parte II, le sedi antiche scomparse*, IGM, Firenze.

SCHMIEDT 1973: Schmiedt G., *Contributo della fotografia aerea alla ricostruzione dell'antica laguna compresa tra Siponto e Salapia*, ArchStorPugl, 26-1-2: pp.159-172.

SCHMIEDT 1974: Schmiedt G., *Atlante aerofotografico delle sedi umane in Italia: parte III, la centuriazione*, IGM, Firenze.

SCHMIEDT 1975: Schmiedt G., *Contributo della fotografia aerea alla conoscenza delle strutture fortificate altomedievali*, in Metodologia della ricerca delle strutture fortificate dell'Alto Medioevo, V Tavola Rotonda Nazionale (Udine-Cividale-Trieste, 26-27-28-29 ottobre 1967): pp. 35-66.

SCHMIEDT 1985: Schmiedt G., *Le centuriazioni di Lucera e Aecae*, L'Universo, 65, 2: pp. 260-304.

SCHMIEDT 1989: Schmiedt G., *Atlante aerofotografico delle sedi umane in Italia: parte III, la centuriazione romana*, IGM, Firenze.

SEBIS 1987: Sebis S., *Ricerche archeologiche nel Sinis centromeridionale. Nuove acquisizioni di età nuragica*, in AA.VV., 1987, La Sardegna nel Mediterraneo tra il secondo e il primo millennio a.C., Atti del II Convegno di

Studi Un millennio di relazioni fra la Sardegna e i Paesi del Mediterraneo, Cagliari., pp. 107-116.

SEBIS 2008: Sebis S., *La stratigrafia del nuraghe Nuracraba (Madonna del Rimedio, Oristano). Campagna di scavo 1983-84*, in AA. VV., 2008, *La Civiltà nuragica – Nuove acquisizioni*, II, Atti del Congresso, Quartu Sant'Elena.: pp. 489-504.

SFACTERIA 2016: Sfacteria M., *Fotomodellazione 3d e rilievo speditivo di scavo: l'esperienza del philosophiana project*, in *Archeologia e Calcolatori* 27: 271 - 289.

SPANEDDA 2006: Spanedda L., *La edad del bronce en el Golfo de Orosei (Cerdeña, Italia)*, Tesis doctoral, Universidad de Granada.

SPANEDDA 2011: Spanedda L., *Fronteras y control territorial en la cuenca del río Cedrino (Cerdeña, Italia) durante la edad del bronce*, in *Quaderns de Prehistòria y Arqueologia de Castelló* 29: pp. 269-290.

SPANU 2002: Spanu P.G., *L'età vandalica e bizantina*, in Brigaglia M., Mastino A., Ortu G.G., *Storia della Sardegna I, Dalla preistoria all'età bizantina; II, Dal Tardo Impero Romano al 1350*, Laterza, Roma-Bari: pp. 58-69.

TANDA 1977: Tanda G., *Arte preistorica in Sardegna. Le figurazioni taurine scolpite dell'Algherese nel quadro delle rappresentazioni figurate degli ipogei sardi a "domus de janas"*, in *QSACO Quaderni della Soprintendenza Archeologica di Cagliari e Oristano* 5, Sassari.

TANDA 1978A: Tanda G., *Ortachis – Bolotana*, in *Rivista di Scienze Preistoriche* XXXII (notiziario): pp. 359-360.

TANDA 1978B: Tanda G., *Monte Dominigu (Uri-SS)*, in *Rivista di Scienze Preistoriche* (notiziario): pp. 447.

TANDA 1985: Tanda G., *L'Arte delle domus de janas nelle immagini di Ingeborg Mangold*, Sassari, Chiarella.

TANDA 1986: Tanda G., *Il carro in età nuragica*, in AA.VV., Società e cultura in Sardegna nei periodi orientalizzante e arcaico. Rapporti tra Sardegna, Fenici, Etruschi e Greci. Atti del I Convegno di Studi Un millennio di relazioni tra la Sardegna e i Paesi del Mediterraneo, Cagliari: pp. 63-80.

TANDA ET ALII 2023: Tanda G., Doro L., Usai L., Buffoni F. (a cura di), (*Candidatura UNESCO 2021*) *Arte e architettura nella preistoria della Sardegna. Le domus de janas*, Condaghes, Cagliari.

TARAMELLI 1931: Taramelli A., *Nuove ricerche dal santuario nuragico di Santa Vittoria di Serri*, in MAL XXXIV: pp. 8-44.

TRUDU 2014: Trudu E., *Insedimenti e abitati di epoca romana nella Sardegna centro-orientale*, in ArcheoArte. Rivista elettronica di archeologia e arte, 3: pp. 105-125.

UGAS 1981: Ugas G., *Selargius- Su Coddu, (Archeologia sarda)*, II, in ESA, Quartu Sant'Elena.

UGAS 1982: Ugas G., *Il villaggio di fase Monte Claro di Corti Beccia e reperti della Capanna 10 ovest*, in Ricerche archeologiche nel territorio di Sanluri: mostra grafica e fotografica: Sanluri, Palazzo civico, 16-26 giugno 1982: pp. 13-17.

UGAS 1990: Ugas G., *La Tomba dei guerrieri di Decimoputzu*, Cagliari.

Ugas 1992: Ugas G., *Note su alcuni contesti del Bronzo medio e recente della Sardegna meridionale. Il caso dell'insediamento di Monte Zara-Monastir*, in AA.VV., 1992, La Sardegna nel Mediterraneo tra il Bronzo medio e il Bronzo recente (XVI-XIII sec. a.C.), Atti del III Convegno di Studi. Un millennio di relazioni fra la Sardegna e i Paesi del Mediterraneo, Cagliari.: pp. 201-227.

UGAS 1993: Ugas G., *San Sperate dalle origini ai baroni*, Cagliari.

UGAS 1998A: Ugas G., *Facies campaniformi dell'ipogeo di Padru Jossu (Sanluri- Cagliari)*, in Nicolis F., Mottes E., Simbolo ed Enigma, Il bicchiere

campaniforme e l'Italia nella preistoria europea del III millennio a.C., Provincia Autonoma di Trento, Trento.: pp. 261- 280.

UGAS 1998B: Ugas G., *Considerazioni sulle sequenze culturali e cronologiche tra l'Eneolitico e l'epoca nuragica*, in *Sardinian and Aegean Chronology*: pp. 251-272.

UGAS 2005: Ugas G., *L'alba dei nuraghi*, Cagliari.

UGAS 2009: Ugas G., *Il I Ferro in Sardegna*, in Lugliè C., Cicilloni R. (a cura di), *La Preistoria e la Protostoria della Sardegna. Volume II – Comunicazioni, Atti della XLIV Riunione Scientifica dell'Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria*, Cagliari, Barumini, Sassari 23-28 novembre 2009, Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Firenze: pp. 163-182.

UGAS 2012: Ugas G., *Discussione III Sessione- Eneolitico*, in Lugliè C., Cicilloni R. (a cura di), *La Preistoria e la Protostoria della Sardegna. Volume II – Comunicazioni, Atti della XLIV Riunione Scientifica dell'Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria* (Cagliari, Barumini, Sassari 23-28 novembre 2009), Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Firenze: p. 631.

UGAS 2015: Ugas G., *Il complesso archeologico del nuraghe Su Mulinu di Villanovafranca*, in Minoja M., Salis G., Usai L. (a cura di), *L'isola delle torri: Giovanni Lilliu e la Sardegna nuragica: Catalogo della Mostra*: Cagliari, 15 marzo-30 settembre 2014; Roma, 28 novembre 2014-7 aprile 2015; Milano, 6 maggio 2015-14 febbraio 2016: pp. 255-259.

UGAS 2017: Ugas G., *La cultura del Vaso Campaniforme e l'antica età del Bronzo in Sardegna*, in A. Moravetti, P. Melis, L. Foddai, E. Alba (a cura di), *La Sardegna preistorica. Storia, materiali, monumenti. Corpora delle Antichità della Sardegna*: pp. 203-254.

UGAS ET ALII 1985: Ugas G., Lai G., Usai L., *L'insediamento prenuragico di Su Coddu (Selargius-Cagliari). Notizia preliminare sulle campagne di scavo 1981-1984*, in *Nuovo Bollettino Archeologico Sardo*, II: pp. 7-40.

UGAS ET ALII 1989: Ugas G., Lai G., Nuvoli M.P., Marras M.G., *Nuovi dati sull'insediamento di Su Coddu-Selargius*, in Dettori Campus L. (a cura di), *La cultura di Ozieri: problematiche e nuove acquisizioni: atti del 1 convegno di studio: Ozieri, gennaio 1986 - aprile 1987*, Il torchietto editore, Ozieri: pp. 239-278.

UGAS ET ALII 2004: Ugas G., Lugliè C., Sebis S. 2004, *La ceramica*, in Cocchi Genick (a cura di) *L'età del bronzo recente in Italia*, Atti del Congresso nazionale, Viareggio: pp. 399-410.

UGAS-LUCIA 1987: Ugas G., Lucia G., *Primi scavi nel sepolcreto nuragico di Antas*, in AA.VV., *La Sardegna nel Mediterraneo tra il secondo e il primo millennio a.C.*, Atti del II Convegno di Studi Un millennio di relazioni fra la Sardegna e i Paesi del Mediterraneo, Cagliari: pp. 255-277.

USAI 1987: Usai L., *Il villaggio di età eneolitica di Terramaini presso Pirri (Cagliari)*, in Atti del IV Convegno Nazionale di Preistoria e Protostoria Preistoria d'Italia alla luce delle ultime scoperte, Pescia (8-9 dicembre 1984), Comune di Pescia- L'Erma di Bretschneider editore, Pescia: pp. 175-196.

USAI 2005: Usai L., *Pre-nuragic metallurgy records*, in Lo Schiavo, Giumlia-Mair A., Sanna U., Valera (a cura di), *Archaeometallurgy in Sardinia from the origin to the beginning of Early Iron Age*, Montagnac, Éditions Monique Mergoil: pp. 257-277.

USAI 2018: Usai A., *Il complesso funerario e scultoreo di Mont'e Prama*, in Cossu T., Perra M., Usai A., *Il tempo dei nuraghi: la Sardegna dal 18. all'8. secolo a.C.*, Nuoro: pp. 384-394.

USAI 2023: Usai L., *La necropoli di Sant'Andrea Priu*, in Tanda G., Dorò L., Usai L., Buffoni F. (a cura di), (Candidatura UNESCO 2021) *Arte e architettura nella preistoria della Sardegna. Le domus de janas, Condaghes*, Cagliari: pp. 172-179.

VACCA 2012: Vacca A., Tesi di laurea, *Lo scavo della Tomba di Corti Beccia a Sanluri Nuove acquisizioni dell'Eneolitico in Sardegna. Scuola di*

specializzazione, Università degli Studi di Cagliari Facoltà di Lettere Scuola di Specializzazione in Archeologia.

VALENTINI *ET ALII* 2004: Valentini P., Pezzuti E., Ubertini A., Milana M., Di Leginio R., *Una metodologia per l'analisi e l'archiviazione di reperti archeologici basata sul rilievo mediante scanner laser tridimensionali a non-contatto*, in Archiviazione e restauro di reperti archeologici mediante tecniche CAD-RP: pp. 45-86.

VANZETTI 2004: Vanzetti A., *La Sicilia occidentale*, in Albanese Procelli R. M., Lo Schiavo F., Martinelli M. C., Vanzetti A., *La Sicilia. Articolazioni cronologiche e differenziazioni locali*, in Cocchi Genick D. (a cura di), *L'età del bronzo recente in Italia*, Atti del Congresso nazionale, Viareggio, pp: 320-325.

VELLI-VELLI 2017: Velli A., Velli E., *Documentazione e ricostruzione 3d di un menhir inedito rinvenuto in località "Sa Perda Fitta", Sant'Anna Arresi (Sardegna sud-occidentale)*, in *Archeologia e Calcolatori*, 28: pp. 165 - 177.

VERSACI-CARDACI 2013: Versaci A., Cardaci A., *L'indagine e la documentazione dei beni culturali in Armenia: il caso studio della zona archeologica e monumentale di Aruch*, Atti XVII Conferenza Nazionale ASITA, Riva del Garda 5-7 novembre 2013: pp. 1265 - 1272.

WATROUS 1992: Watrous L.V., *Kommos III. The Late Bronze Age Pottery*, Princeton.

WHITEHEAD *ET ALII* 2014: Whitehead K., Hugenholtz C. H., *Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft system (sUAS), part 1: a review of progress and challenges*, in *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2: pp. 69 - 85.

ZONI 2017: Zoni F., *L'uso della tecnologia dem nella documentazione archeologica. Alcune applicazioni in casi di scavo stratigrafico e nello studio dell'edilizia storica*, in *Archeologia e Calcolatori*, 28: 219 – 238.

ZUCCA 2002: Zucca R., *I Greci e la Sardegna in età arcaica nel contesto mediterraneo*, in *Etruria e Sardegna*: pp. 111-122.

Sitografia

www.archeologiaaerea.it

www.asita.it/conferenza

www.autodesk.it

www.binarioprint.it

www.bing.com/maps

www.danielgm.net

www.dino-lite.eu

www.geomax.it

www.google.it/maps

www.laseraidedprofiler.com

www.mdpi.com/journal/drones

www.pcn.minambiente.it/GN

www.pcn.minambiente.it/viewer

www.sardegнатerritorio.it/webgis/sardegnamappe

www.stampa3d-forum.it

www.topconpositioning.com/it

www.trimble.com

www.trimble.com

www.webgis.regione.sardegna.it/ricercatoponimi