



Escuela Politécnica Superior

Departamento de Ingeniería

Área de Expresión Gráfica en la Ingeniería

TESIS DOCTORAL

**APLICACIONES DE LA GEOMÁTICA A LA
ARQUEOLOGÍA Y CIENCIAS AFINES**

**GEOMATICS APPLICATIONS TO
ARCHAEOLOGY AND RELATED SCIENCES**

Doctorando: M. del Carmen Marín Buzón

Directores: Dr. Francisco Manzano Agugliaro

Dr. Antonio Miguel Pérez Romero

Almería, julio 2020



ESIS DOCTORAL

Nombre Doctorando/a	María Carmen, Marín Buzón
NIF/NIE/Pasaporte	
Título de la Tesis	Aplicaciones de la Geomática a la Arqueología y ciencias afines
Programa Doctorado	Doctorado en Tecnología de Invernaderos e Ingeniería Industrial y Ambiental (RD 99/2011)

01. DIRECTOR

Documento de Identidad (NIF / NIE / PSP)		Nacionalidad	
Apellidos, Nombre	Manzano Agugliaro, Francisco		
Correo electrónico			
Universidad/Centro	Universidad de Almería	País	España

02. CODIRECTOR

Documento de Identidad (NIF / NIE / PSP)		Nacionalidad	
Apellidos, Nombre	Pérez Romero, Antonio Miguel		
Correo electrónico			
Universidad/Centro	Universidad de Sevilla	País	España

AUTORIZACION DEL DIRECTOR/ES DE LA TESIS

El/los Director/es de la Tesis arriba mencionada AUTORIZA el depósito y la presentación de la misma para su defensa, **garantizando la originalidad de la tesis** de acuerdo a lo establecido en la Normativa de Estudios Oficiales de Doctorado de la Universidad de Almería.

El Director

El Codirector

Fdo.: Manzano Agugliaro, Francisco

Fdo.: Pérez Romero, Antonio Miguel

Y con esta fecha se remite la presente comunicación

Almería, a 28 de Julio de 2020

Dedicatoria

A todo aquel que sepa ver en ella el esfuerzo, dedicación y entrega ...

A mi madre por ser la persona que confió siempre en mis capacidades.

Agradecimientos

Dijo A. Einstein: *“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como la oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”* y yo me siento afortunada por las personas que me han rodeado a lo largo de mi vida y que me han inculcado la necesidad de preguntar, observar y saber. Muy agradecida a mis compañeros de trabajo, ese “equipo A”, que me han ayudado en todo momento y han confiado en mí desde el principio, llegando la última y siendo una más en esta bonita función de la docencia e investigación. A mis directores de tesis, ejemplares, entregados y con unos conocimientos de los cuales he aprendido mucho. Al grupo de investigación de arqueólogos de Almería, por brindarme la oportunidad de participar en dicho grupo y abrir una vertiente muy interesante y productiva en mi investigación. Y por supuesto a mi familia, a mi marido, por haberme permitido cumplir mi sueño de llegar hasta aquí, a cambio de horas y horas de trabajo, y seguro que contaré con todo su apoyo para que mi carrera, siempre ilusionante y sin fin, sea mi satisfacción como profesional. Gracias a todos por la confianza, vuestro tiempo y sabiduría puestas en mí, gracias, gracias, gracias.

Resumen

Esta tesis doctoral se ha desarrollado por la necesidad de involucrar las disciplinas que engloba la Geomática con las recientes técnicas fotogramétricas. Inicialmente la investigación comenzó como una comparativa de la fotogrametría con láser escáner (HDS), pero no siempre ha sido asequible la utilización de HDS en las distintas zonas de trabajo. La mayor parte de los estudios se producen en el ámbito de la Arqueología, utilizando métodos fotogramétricos y en algún caso de láser escáner, pero sin olvidar implementar las técnicas de georreferenciación que proporciona la Geomática.

Este documento se estructura en una serie de capítulos que son:

El **Capítulo 1**, donde se detallan los objetivos a cubrir por la tesis y para tener una visión general de la fotogrametría y la arqueología se realiza un estudio bibliométrico.

El **Capítulo 2**, donde se realiza un estudio fotogramétrico empleando tomas de fotografía aérea de la ciudad antigua de Útica. El objetivo es obtener un modelo de la zona donde se realizan excavaciones y zonas aledañas por si surgen en un futuro nuevos descubrimientos.

El **Capítulo 3**, en él se realiza un estudio fotogramétrico, pero en esta ocasión empleando técnicas de fotogrametría terrestre, de los distintos cortes descubiertos en la ciudad de Útica.

El **Capítulo 4**, en él se realiza una comparativa entre resultados obtenidos con fotogrametría y HDS de un mosaico romano encontrado en la ciudad Sevillana de Cantillana.

El **Capítulo 5**, donde se realizan tomas de datos para decidir qué metodología resulta más eficaz para obtener el volumen de copa de árboles, en concreto de naranjos. Se ponen en práctica distintos métodos como, medición tradicional con cinta métrica, fotogrametría aérea (UAV), HDS y por último se utilizan imágenes de Google Map.

El **Capítulo 6**, recoge el cómputo total de todas las conclusiones obtenidas en cada uno de los capítulos de esta tesis.

El **Capítulo 7**, es el resumen de cada una de las referencias bibliográficas que han ayudado a documentar este trabajo.

El **Capítulo 8**, se centra en citar las posibles líneas de investigación que puedan surgir de toda la investigación generada en esta tesis. Se establecen posibles publicaciones que puedan derivarse de la tesis presentada.

Palabras clave: HDS, SfM, Geomática, Fotogrametría, MDE, 3D, Georreferenciación, Arqueología, TLS, GNSS, GCP.

Abstract

This doctoral thesis has been developed because of the need to involve the disciplines that comprise Geomatics with recent photogrammetric techniques. Initially the research started as a comparison of laser scanning photogrammetry (LPS), but the use of LPS in different work areas has not always been affordable. Most of the studies are produced in the field of Archaeology, using photogrammetric methods and in some cases laser scanning, but without forgetting to implement the georeferencing techniques provided by Geomatics.

This document is structured in a series of chapters that are

Chapter 1, which details the objectives to be covered by the thesis and to have an overview of photogrammetry and archaeology, a bibliometric study is carried out.

Chapter 2, where a photogrammetric study is carried out using aerial photography of the ancient city of Utica. The aim is to obtain a model of the area where excavations are being carried out and surrounding areas in case new discoveries arise in the future.

In Chapter 3, a photogrammetric study is carried out, but this time using terrestrial photogrammetry techniques, of the different cuts discovered in the city of Utica.

Chapter 4 compares the results obtained with photogrammetry and MSDS from a Roman mosaic found in the Sevillian city of Cantillana.

Chapter 5, where data are taken to decide which methodology is more efficient to obtain the volume of tree tops, specifically of orange trees. Different methods are put into practice, such as, traditional measurement with a tape measure, aerial photogrammetry (UAV), HDS and finally images from Google Map are used.

Chapter 6 shows the total calculation of all the conclusions obtained in each of the chapters of this thesis.

Chapter 7, is the summary of each of the bibliographic references that have helped to document this work.

Chapter 8, focuses on citing the possible lines of research that may emerge from all the research generated in this thesis. It establishes possible publications that could be derived from the thesis presented.

Keywords: HDS, SfM, Geomatics, Photogrammetry, DEM, 3D, Georeferencing, Archaeology, TLS, GNSS, GCP

ÍNDICES

Índice

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	7
1.2. Objetivos	8
1.3. Fotogrametría aplicada a la Arqueología: Evolución histórica	8
1.4. La Fotogrametría aplicada a la Arqueología: Países y Centros de investigación.....	10
1.5. La Fotogrametría aplicada a la Arqueología: Temáticas de investigación.....	12
1.6. Conclusiones de los antecedentes.....	18
1.7. Referencias	19

CAPÍTULO 2

2. YACIMIENTOS ARQUEOLÓGICOS A GRAN ESCALA: EL CASO DE ÚTICA (TÚNEZ)	29
2.1. Descripción del yacimiento: relevancia y ubicación	29
2.2. Objetivos	30
2.3. Establecimiento de una red geodésica de control con GPS	30
2.4. Vuelo con UAV	33
2.4.1. Puntos de control. Diseño, materialización y observación.....	33
2.4.2. Ejecución del vuelo	36
2.5. Resultados	38
2.5.1. Solapes y recubrimientos obtenidos	38
2.5.2. Procesado de datos: Ortofotografía, plano con curvas de nivel	40
2.6. Conclusiones	47
2.7. Referencias.....	50

CAPÍTULO 3

3. TÉCNICAS GEOMÁTICAS APLICADAS A LOS CORTES ARQUEOLOGICOS EN LA CIUDAD DE ÚTICA (TÚNEZ).....	60
3.1. Introducción: Cortes Arqueológicos	60
3.2. Situación de los cortes arqueológicos estudiados	61
3.3. Metodología	63
3.3.1 Establecimiento de puntos de control de cada corte.....	63
3.3.2 Georreferenciación de los puntos de control de cada corte	65
3.3.3. Metodología para la Toma de Fotografías	65
3.3.4. Procesado de Información	67
3.3.5. Modelo 3D	71

3.4. Resultados de Ortofotografía y Modelo Digital de Elevaciones del corte 20	72
3.5. Resultados del Corte10.....	76
3.6. Resultado Corte 11.....	91
3.7. Resumen de resultados de Cortes	112
3.8. Conclusiones	113
3.7. Referencias	114

CAPÍTULO 4

4. APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA vs HDS A EXCAVACIONES: CANTILLANA	123
4.1 Introducción	123
4.2 Descripción del Corte.....	124
4.3 Georreferenciación de la zona	125
4.4 Técnicas SfM	127
4.4.1 Metodología SfM.....	127
4.4.2 Resultados: Modelo Digital de Elevaciones y Ortomosaico	136
4.5 Técnicas HDS	138
4.5.1 Metodología HDS	138
4.5.2 Resultados: Nube de puntos	142
4.6 Comparativa SfM y HDS.....	142
4.6.1. Comparativa SfM vs TCR705	145
4.6.2. Comparativa P20 vs GCP DE TCR705.....	147
4.6.3. Comparativa P20 vs Modelo SFM	148
4.6.4. Conclusiones de las comparativas	148
4.7. Conclusiones	149
4.8. Referencias.....	150

CAPÍTULO 5

5. Aplicaciones de la Geomática a la Ingeniería Abstract	159
5.1. Introduction	159
5.2. Data	162
5.3. Methods	163
5.3.1. Traditional Method (TM)	163
5.3.2. Aerial Photogrammetry (UAV).....	166
5.3.3. High Definition Survey (HDS)	168
5.3.4. Proposed Method Using Google Maps (GM)	170

5.3.5. Statistical Analysis	172
5.4. Results	172
5.5. Discussion	177
5.6. Conclusions	179
5.7. References	180

CAPÍTULO 6

6. Conclusiones Generales	185
--	-----

CAPÍTULO 7

7. Referencias	189
-----------------------------	-----

CAPÍTULO 8

8. Futuras líneas de investigación y posibles publicaciones derivadas de la tesis	207
8.1. Futuras líneas de investigación	209
8.2. Publicaciones derivadas de la tesis	209

Índice de Figuras

Figura 1. 1. Distribución por campos científicos de la investigación en Fotogrametría y Arqueología	9
Figura 1. 2. Evolución temporal de la investigación en Fotogrametría y Arqueología	10
Figura 1. 3. Principales Afiliaciones en la investigación en Fotogrametría y Arqueología	11
Figura 1. 4. Distribución por países de la investigación en Fotogrametría y Arqueología	12
Figura 1. 5. Nube de palabras realizada con las palabras clave de la investigación en Fotogrametría y Arqueología	12
Figura 1. 6. Evolución de la investigación en Fotogrametría y Arqueología en términos de Keywords	13
Figura 1. 7. Evolución por países de la investigación en Fotogrametría y Arqueología en términos de Keywords	14
Figura 1. 8. Clústeres de la investigación en Fotogrametría y Arqueología	16
Figura 2.1: Zona Yacimiento. Fuente Google Earth	29
Figura 2.2: Equipo GNSS. Equipo referencia	31
Figura 2.3: Emplazamiento antena referencia GNSS con equipo RTK	32
Figura 2.4: Equipo RTK en punto A, medición campaña 2018	32
Figura 2.5: Toma de puntos en yacimiento y cortes	33
Figura 2.6: GCP previo al vuelo	34
Figura 2.7: Diana para visualización de GCP	34
Figura 2.8: Distribución de GCP en la zona	36
Figura 2.9: Aterrizaje del dron Phantom2 en el área de trabajo.	36
Figura 2.10: Plan de vuelo	37
Figura 2.11: Detalle de la zona de vuelo. Fuente Google Earth	37
Figura 2.12: Fotografías 16 y 36 tomadas desde dron (zona de interés)	38
Figura 2.13: Solape de imágenes	39
Figura 2.14: Esquema comportamiento del solape según orografía	39
Figura 2.15: Flujo de trabajo	40
Figura 2.16: Nube Dispersa	41
Figura 2.17: Posiciones de puntos de control y estimación de errores.	42
Figura 2.18: Nube de puntos densa	44
Figura 2.19: Malla sombreada	45
Figura 2.20: Modelo con textura	46
Figura 2.21: Modelo Digital de elevaciones (MDE)	47
Figura 2.22: Curvas de nivel del yacimiento, a 6m	48
Figura 2.23: Ortomosaico, zona Utica	49
Figura 3.1. Ubicación Yacimiento Útica	61
Figura 3.2. Sectores de estudio en el año 2010 en el Yacimiento Útica	62
Figura 3.3. Ubicación de los cortes y ejemplos de prospección geofísica	63
Figura 3.6. Toma de fotografías. Corte 20	66
Figura 3.7. Disposición de cámaras. Corte 20	67
Figura 3.8. Solape. Corte 20	67
Figura 3.9. Nube de puntos dispersa. Corte 20	68
Figura 3.10. Puntos GCP. Corte 20	69
Figura 3.11. Validación Puntos de control. Corte 20 (La elipse verde de error está en mm)	69
Figura 3.12. Nube de puntos densa. Corte 20	71

Figura 3.13. Malla sombreada. Corte 20	72
Figura 3.14. Modelo con textura. Corte 20	72
Figura 3.15. MDE. Corte 20	73
Figura 3.16. Curvas de nivel en MDE y Ortomosaico	74
Figura 3.17. Ortomosaico. Corte 20	74
Figura 3.18. Ortofoto y MDE representado en QGIS. Corte 20	75
Figura 3.19. Disposición de cámaras	77
Figura 3.20. Solape. Corte 10-sector 1	77
Figura 3.21. Nube dispersa. Corte 10-sector 1	78
Figura 3.22. Posiciones de GCP y estimación de errores	78
Figura 3.23. Nube de puntos densa. Corte 10-sector 1	79
Figura 3.24. Malla sombreada. Corte 10-sector 1	80
Figura 3.25. Modelo con textura. Corte 10-sector 1	81
Figura 3.26. Vistas del modelo con textura. Corte 10-sector 1	81
Figura 3.27. A) MDE. B) MDE con sombreado de Relieve. Corte 10-sector 1	82
Figura 3.28. Curvas de nivel a 0.5m en MDE	82
Figura 3.29. Ortomosaico. Corte 10-sector 1	83
Figura 3.30. Comparativa métrica en QGIS	83
Figura 3.31. Medición de un lateral del corte 10-sector 1	84
Figura 3.32. Disposición de las cámaras. Corte 10-sector 2	84
Figura 3.33. Solape. Corte 10-sector 2	85
Figura 3.34. Nube de puntos dispersa. Corte 10-sector 2	86
Figura 3.35. Posiciones de marcadores y estimaciones de errores	86
Figura 3.36. Nube de puntos densa. Corte 10-sector 2	87
Figura 3.37. Malla sombreada. Corte 10-sector 2	88
Figura 3.38. Modelo con textura. Corte 10-sector 2	88
Figura 3.39. MDE. Corte 10-sector 2	89
Figura 3.40. MDE con sombreado. Corte 10-sector 2	89
Figura 3.41. Curvas de nivel a 0.5m. Corte 10-sector 2	90
Figura 3.42. Ortomosaico. Corte 10-sector 2	90
Figura 3.43. Ortomosaico en QGIS con comparativa de coordenadas	91
Figura 3.44. Disposición de cámaras. Corte 11- sector C	92
Figura 3.45. Solape. Corte 11-sector C	92
Figura 3.46. Nube de puntos dispersa. Corte 11-sector C	93
Figura 3.47. Posiciones de GCP y estimación de errores. Corte 11-sector C	94
Figura 3.48. Nube de puntos densa. Corte 11-sector C	95
Figura 3.49. Malla sombreada. Corte 11-sector C	96
Figura 3.50. Modelo con textura. Corte 11-sector C	96
Figura 3.51. MDE. Corte 11-sector C	97
Figura 3.52. Curvas de nivel a 0.2m. Corte 11-sector C	97
Figura 3.53. Ortomosaico. Corte 11-sector C	98
Figura 3.54. Comparativa métrica en QGIS	98
Figura 3.55. Distribución de cámara. Corte 11-sector D	99
Figura 3.56. Solape. Corte 11-sector D	99
Figura 3.57. Nube de puntos dispersa. Corte 11-sector D	100
Figura 3.58. Posiciones de GCP. Corte 11-sector D	100
Figura 3.59. Nube de puntos densa. Corte 11-sector D	102
Figura 3.60. Malla sombreada. Corte 11-sector D	102

Figura 3.61. Modelo con textura. Corte 11-sector D _____	103
Figura 3.62. Distintas vistas del modelo con textura. Corte 11-sector D _____	103
Figura 3.63. MDE con relieve. Corte 11-sector D _____	104
Figura 3.64. Curvas de nivel en el MDE. Corte 11-sector D _____	104
Figura 3.65. Ortomosaico. Corte 11-sector D _____	105
Figura 3.66. Digitalización del Corte 11-sector D con QGIS _____	105
Figura 3.67. Alzados. Corte 11-sector D _____	106
Figura 3.68. Disposición de cámaras. Corte 11-sector F _____	106
Figura 3.69. Solape de las imágenes. Corte 11-sector F _____	107
Figura 3.70. Nube de puntos dispersa. Corte 11-sector F _____	107
Figura 3.71. Posiciones y estimación de errores de los GCP. Corte 11-sector F _____	108
Figura 3.72. Nube de puntos densa. Corte 11-sector F _____	109
Figura 3.73. Malla sombreada. Corte 11-sector F _____	109
Figura 3.74. Modelo con textura. Corte 11-sector F _____	110
Figura 3.75. MDE. Corte 11-sector F _____	110
Figura 3.76. Curvas de nivel a 0.5m. Corte 11-sector F _____	111
Figura 3.77. Ortomosaico. Corte 11-sector F _____	111
Figura 3.78. Vistas 3D de modelo con textura. Corte 11-sector F _____	112
Figura 4.1: Situación del Mosaico de Cantillana _____	124
Figura 4.2: Mosaico Naeva _____	124
Figura 4.3: Flujo de trabajo en mosaico Naeva _____	125
Figura 4.4: GNSS como base _____	126
Figura 4.5: Tomas de GCP. Mosaico Naeva _____	127
Figura 4.6: GCP en distintas zonas del mosaico _____	128
Figura 4.7:GCP con miniprisma _____	128
Figura 4.8: Toma de fotografías. Mosaico Naeva _____	129
Figura 4.9: Solape de fotografías _____	129
Figura 4.10: Flujo de trabajo en metodología SfM _____	130
Figura 4.11: Ajuste Bundle. Fuente: New York University, 2016 _____	130
Figura 4.12: Nube dispersa. Mosaico Naeva _____	131
Figura 4.13: Errores en GCP _____	132
Figura 4.14: Nube de puntos densa. Mosaico Naeva _____	133
Figura 4.15: Imposición de medidas al objeto. Mosaico Naeva _____	134
Figura 4.16: Malla de alambre. Mosaico Naeva _____	135
Figura 4.17: Modelo con textura. Mosaico Navea _____	135
Figura 4.18: MDE. Mosaico Naeva _____	136
Figura 4.19: Curvas de nivel a 0.01m en sombreado de relieve. Mosaico Naeva _____	137
Figura 4.20: Ortomosaico. Mosaico Naeva _____	137
Figura 4.21: Esquema del método WFD. Fuente Leica Geosystems _____	139
Figura 4.22: Posiciones del escáner P20 _____	139
Figura 4.23: Esquema de estacionamiento del escáner y posición de dianas _____	140
Figura 4.24: Característica de escaneo _____	140
Figura 4.25: Nube de puntos generada con HDS _____	142
Figura 4.26: Superposición de nube de puntos HDS sobre modelo SfM _____	143
Figura 4.27: Representación de puntos HDS sobre modelo en zona de sumidero _____	143
Figura 4.28: Vista de los puntos HDS que quedan por debajo del modelo SfM _____	144
Figura 4.29: Fragmento del mosaico con GCP en SfM _____	145

Figura 4.30: GCP sobre fragmento del mosaico con técnica SfM	146
Figura 4.31: Análisis de SfM & GCP en fragmento del mosaico	146
Figura 4.32: Análisis P20 & GCP de TCR705	147
Figura 4.33: Análisis SfM & P20	148
Figura 4.34: Efecto del láser en superficies como el mármol. Fuente: 3DRiskMapping 2008	149
Figura 5. 1. Research trend clusters related to tree crown volume estimation	160
Figura 5. 2. Location of the trials	162
Figura 5. 3. . Location of the trials at the University of Sevilla (Spain)	163
Figura 5. 4. The traditional method for tree crown size assessment	164
Figura 5. 5. Tree crown size measurement by traditional method	165
Figura 5. 6. Results display the traditional method (TM)	166
Figura 5. 7. Unmanned aerial vehicle (UAV) paths	167
Figura 5. 8. Model from UAV: (A) Mesh; (B) Texture	168
Figura 5. 9. High definition survey (HDS) in the trial. (A) HDS Station. (B) Ranging rod and tripods placed on the stakes. (C) Orange Trees	169
Figura 5. 10. Model from HDS. (A) High-density point cloud. (B) Clipped point cloud. (C) Whole tree 2. (D) Tree crown 2	170
Figura 5. 11. Methodology chart for the proposed method using Google Maps (GM)	171
Figura 5. 12. Example of images captured from GM	171
Figura 5. 13. Model from GM. (A) High-density point cloud. (B) Clipped point cloud. (C) Textured model	172
Figura 5. 14. Overlapping of models created with 3DRehaper	173
Figura 5. 15. Visual assessment of the different methods for tree 7. (A) TM vs. tree. (B) UAV vs. TM. (C) HDS vs. TM. (D) GM vs. TM	174
Figura 5. 16. The visual composition of the TM (ellipsoid) and the HDS for tree 7, the red lines mark the cross-sections. (A) Frontal view. (B) Side view (left-right). (C) Top view (with leaves). (D) Top view (contour)	174
Figura 5. 17. Cross-sections at different heights (above sea level) of tree 7 for TM and HDS (contour). (A) Cross-section at 22.4 m. (B) Cross-section at 23 m. (C) Cross section at 23.4 m. (D) Cross-section at 24 m. (E) Cross-section at 24.5 m. (F) Cross-section at 24.7 m.	175
Figura 5. 18. Volume error (m3) related to absolute tree crown size	176
Figura 5. 19. Research trend evolution to tree crown volume estimation	177
Figura 5. 20. Statistical analysis of the methods used (Bonferroni test)	178
Figura 8.1. Publicación derivada de la tesis	210

Índice de Tablas

Tabla 1. 1. Fotogrametría aplicada a la Arqueología: Evolución de las palabras clave	14
Tabla 1. 2. Fotogrametría aplicada a la Arqueología: Clústeres de la investigación	18
Tabla 2.1:Coordenadas expedición inglesa	31
Tabla 2.2: Coordenadas expedición 2018	32
Tabla 2.3: Coordenadas de puntos de control UTM 32N basados en el elipsoide WGS84	35
Tabla 2.4: Errores Puntos de Control en cm y Errores en píxel	43
Tabla 3.1. Coordenadas relativas en metros. Corte 20	64
Tabla 3.2. Coordenadas UTM. Corte 20	65
Tabla 3.3: Errores de puntos de apoyo o marcadores. Corte20	70
Tabla 3.4: Comparativa de Coordenadas UTM entre Estación Total y QGIS. Corte 20	75
Tabla 3.5. Errores de GCP. Corte 10-sector 1	79
Tabla 3.6. Errores de GCP. Corte 10-sector 2	87
Keywords: HDS, SfM, Geomatics, Photogrammetry, DEM, 3D, Georeferencing, Archaeology, TLS, GNSS, GCP	94
Tabla 3. 9. Errores de GCP. Corte 11-sector F	108
Tabla 3.10. Resultado SfM de los Cortes	112
Tabla 4.1: Errores de los GCP en el Mosaico Naeva	132
Tabla 5. 1. Traditional method (TM) results	165
Tabla 5. 2. Results of the crown volumes (m ³) of the orange trees with each of the methods studied	175
Tabla 5. 3. Volume error with respect to the reference method (HDS)	176
Tabla 5. 4. Statistical analysis of the 4 methods	177

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Índice

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	7
1.2. Objetivos	8
1.3. Fotogrametría aplicada a la Arqueología: Evolución histórica	8
1.4. La Fotogrametría aplicada a la Arqueología: Países y Centros de investigación.....	10
1.5. La Fotogrametría aplicada a la Arqueología: Temáticas de investigación.....	12
1.6. Conclusiones de los antecedentes.....	18
1.7. Referencias.....	19

Índice de Figuras

Figura 1. 1. Distribución por campos científicos de la investigación en Fotogrametría y Arqueología _____	9
Figura 1. 2. Evolución temporal de la investigación en Fotogrametría y Arqueología _____	10
Figura 1. 3. Principales Afiliaciones en la investigación en Fotogrametría y Arqueología _____	11
Figura 1. 4. Distribución por países de la investigación en Fotogrametría y Arqueología _____	12
Figura 1. 5. Nube de palabras realizada con las palabras clave de la investigación en Fotogrametría y Arqueología _____	12
Figura 1. 6. Evolución de la investigación en Fotogrametría y Arqueología en términos de Keywords _____	13
Figura 1. 7. Evolución por países de la investigación en Fotogrametría y Arqueología en términos de Keywords _____	14
Figura 1. 8. Clústeres de la investigación en Fotogrametría y Arqueología _____	16

Índice de Tablas

Tabla 1. 1. Fotogrametría aplicada a la Arqueología: Evolución de las palabras clave _____	14
Tabla 1. 2. Fotogrametría aplicada a la Arqueología: Clústeres de la investigación _____	18

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La fotogrametría es un método desarrollado a principios del siglo XIX (Valenca et al. 2012). La primera fotografía aérea fue tomada en 1858 por el coronel francés Aime Laussedat (1819-1907) (Claser y Saliba, 1972), aunque Laussedat había comenzado sus experimentos para utilizar imágenes con fines de cartografía topográfica a principios de 1851 (Albertz, 2007). Más tarde, el capitán del ejército austríaco Theodor Scheimpflug (1865-1911) llevó a cabo la rectificación zonal alrededor de 1900, sentando así las bases para la rectificación diferencial utilizada en la Ortofotografía (Bervoets, 1969), y el Dr. Carl Pulfrich (1858-1927) construyó el primer estereocomparador en 1902, que permite una vista estereoscópica del relieve.

Así, la historia de la fotogrametría comenzó con la simple fotogrametría terrestre, basada en los principios de las intersecciones en perspectiva, pasó por la fotogrametría terrestre estereoscópica, y en su versión aérea pasó por los globos. Uno de los primeros resultados prácticos de la fotogrametría aérea (utilizando un globo), o cartografía, fue logrado por el capitán italiano Cesare Tardivo (1870-1953), en 1911 estableció un mosaico de Venecia con fotografías en globo, y en 1913 creó un mosaico de 1:4.000 de Bengasi en Libia de las fotografías aéreas tomadas desde aviones (da Silva, 2012).

Con el comienzo de la Primera Guerra Mundial (1914-1918) las fotografías comenzaron a ser utilizadas intensamente para reconocer el campo del enemigo. También la Segunda Guerra Mundial tuvo un efecto importante en el desarrollo de la fotogrametría, pero sólo después de la Segunda Guerra Mundial se hicieron verdaderos avances en lo que respecta a los métodos analíticos (https://www.isprs.org/proceedings/xxix/congress/part6/311_xxix-part6.pdf). Como ejemplo conocido de ello fueron los vuelos de los años cincuenta, que se enmarcan en las actividades internacionales de los Estados Unidos durante el período de la guerra fría (1945-1989). Por ejemplo, el proyecto de vuelo español, llamado 54-AM-78, conocido como el Vuelo Americano, que hizo fotografías desde altitudes entre 15.000 y 18.200 pies sobre el nivel del mar (4.570 y 5.550 m), es decir, una escala media de estas series de fotografías de 1:30 000 (Pérez et al., 2014).

Así, la adquisición de información masiva ha sido una característica permanente en la historia del mundo y la fotogrametría ha jugado un papel importante en ello. Además, con la fotografía digital asociada al desarrollo del procesamiento de imágenes y su automatización, estas técnicas se han vuelto ampliamente atractivas en diversas áreas de aplicación. Hoy en día, el uso de la información en línea en nuestro entorno tiene una gran demanda para todo tipo de aplicaciones sociales y se utiliza cada vez más con fines de investigación. Por ello, plataformas cartográficas como Google Earth (GE) se utilizan ampliamente para ofrecer una visión clara de zonas o edificios (Inzerillo, 2019), datos de elevación (Hu et al., 2020), o para mejorar el geoturismo utilizando la realidad aumentada (González-Delgado et al., 2020).

A partir de vuelos de aviones convencionales como los mencionados anteriormente, la tecnología de los vehículos aéreos no tripulados permite capturar rápidamente superficies importantes de terreno en un tiempo razonable y a bajo costo (Perea-Moreno et al., 2016). La utilización de los vehículos aéreos no tripulados ha dado lugar a la utilización generalizada de la fotogrametría aérea en muchos más campos de los que se disponía anteriormente. De hecho, las técnicas que se utilizan ahora se basan en las tradicionales, pero los requisitos, el equipo necesario y la complejidad de las tareas se han reducido considerablemente. Por lo tanto, la fotogrametría de los UAV puede entenderse como una herramienta de medición fotogramétrica

de bajo costo. Se ha utilizado en muchas situaciones en las que antes no era posible, como en los sitios arqueológicos (Fernández-Hernandez et al., 2015), o en la silvicultura y la agricultura (Grenzdörffer et al., 2008).

1.2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es analizar las aplicaciones de la Geomática a la Arqueología y Ciencias afines, así como sus futuras líneas de investigación. Para ello se marcan los siguientes objetivos específicos:

- 1- Realizar un análisis bibliométrico de la investigación realizada hasta el momento en relación con la Fotogrametría y la Arqueología con el fin de detectar cual son las principales líneas de investigación que se están llevando a cabo.
- 2- Analizar las ventajas e inconvenientes de la Fotogrametría realizada con dron (UAV) en grandes Yacimientos arqueológicos, es decir a gran escala, para ello se aplicará a un caso de estudio en el Norte de África, el yacimiento de UTICA en Túnez.
- 3- Analizar las ventajas e inconvenientes de la Fotogrametría realizada a pequeña escala, es decir a nivel de excavación o de corte arqueológico. Para ello se aplicará a distintos cortes arqueológicos en el yacimiento de UTICA en Túnez.
- 4- Analizar las ventajas e inconvenientes de los métodos de HDS y Fotogrametría para cortes arqueológicos, para ello se aplicará a un mosaico romano en Cantilla (Sevilla, España).
- 5- Analizar las ventajas e inconvenientes de los métodos fotogramétricos empleando imágenes existentes de grandes plataformas web como Google Maps. Se aplicará al cálculo volumétrico de copas de árboles en Sevilla (España).

1.3. Fotogrametría aplicada a la Arqueología: Evolución histórica

Aunque se ha descrito brevemente la evolución de la fotogrametría, este capítulo no estaría completo si no se describe en paralelo al empleo de la misma en la arqueología. Por ello se hace un breve estudio bibliométrico sobre una de las principales bases de datos de indexación científica como es Scopus (Garrido-Cardenas et al., 2018a) que solapa en muchas áreas científicas en un gran porcentaje con WOK (Salmerón-Manzano & Manzano-Agugliaro, 2019).

En concreto la cadena de búsqueda fue: *(TITLE-ABS-KEY (archaeology) AND TITLE-ABS-KEY (photogrammetry))*. La búsqueda arroja algo más de 700 resultados, de los cuales el 52 % es en formato de comunicación a congreso, el 43 % de artículos (de los cuales el 2.5 % son artículos de revisión en este campo), y algo menos del 2 % son libros o capítulos de libro. Esto es un indicador de que este campo de investigación es ciertamente novedoso, pues cuando más consolidado está mayor es el porcentaje de libros, y de artículos, sin embargo, cuando es dominado por las comunicaciones a congreso está todavía en alza (Garrido-Cardenas et al., 2018b).

Si se analizan estos resultados por las categorías científicas en las que están indexados, se observa, como era de esperar, que está dominada por Social Science (26 %) donde se engloban parcialmente los estudios de Arqueología, pero seguida muy de cerca, y casi al mismo nivel por

Computer Science (24 %), luego por Arts and Humanities (12 %) que es el campo más significativo de la Arqueología. Por último, los campos de Earth and Planetary Sciences (9%) que es donde tradicionalmente engloba la geomática junto con el campo de Engineering (8%). Los demás campos como puede observar en la figura 1, tienen una relevancia menor. Hay que hacer notar que un mismo trabajo puede estar indexado en varias categorías científicas a la vez. Por ejemplo, un trabajo muy destacado es una revisión del empleo de drones para hacer mapas 3D (Nex & Remondino, 2014), este trabajo lógicamente trata de la arqueología, pero también de otras ciencias como la Ingeniería donde también está indexado este trabajo, puesto que emplean estos métodos, ya que plantean que los drones o UAVs pueden ser considerados como una alternativa de bajo costo a la clásica fotogrametría aérea tripulada. Sin embargo, otras publicaciones están indexadas en función de la revista como por ejemplo los un caso d estudio en la Cueva del Paleolítico Superior de Parpalló para la documentación arqueológica en 3D mediante escaneo láser terrestre y fotogrametría de corto alcance (Lerma et al., 2010). La categoría de Computer Science por ejemplo contempla más avances en la técnica de análisis de imágenes, como por ejemplo la reconstrucción automatizada de escenas 3D a partir de secuencias de imágenes (Pollefeys et al., 2000), o investigaciones concretas sobre de sistemas de UAV y modos de vuelo para aplicaciones fotogramétricas (Eisenbeiss & Sauerbier, 2011). Esta última categoría, Computer Science tiene bastante solape con la de Engineering, en la línea de investigación que se está analizando. Como anécdota son las categorías que podríamos considerar como accesorias o secundarias: Energy, Medicine, Decision Science, esto como se ha comentado, es el resultado de artículos de revisión que implican o abarcan todos los ámbitos de estudio donde se puede aplicar determinada tecnología, es decir que el trabajo está indexado también en estas categorías.

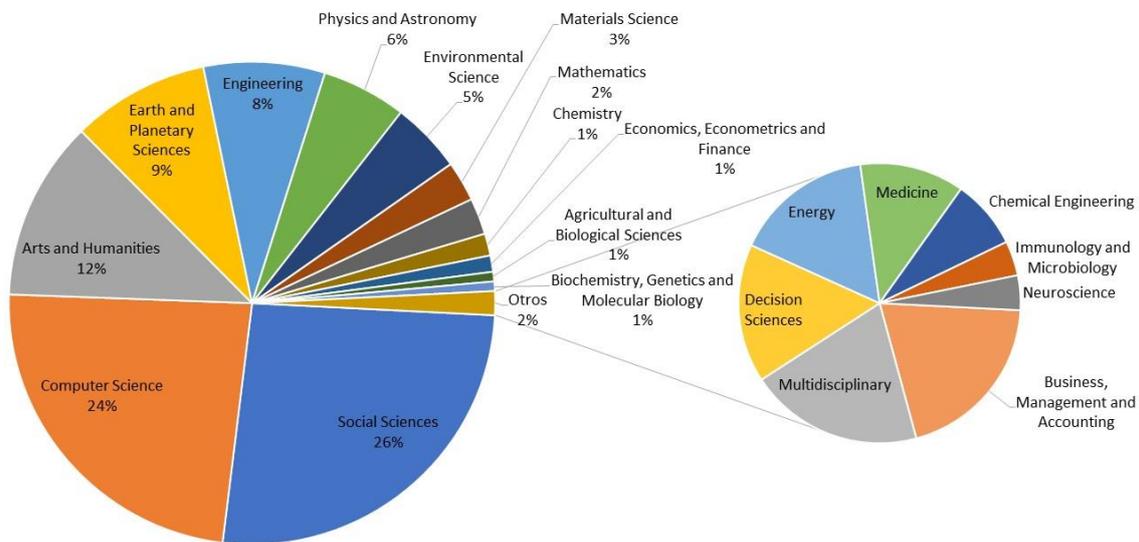


Figura 1. 1. Distribución por campos científicos de la investigación en Fotogrametría y Arqueología

A lo largo del tiempo la evolución de estos trabajos, véase figura 1.2, ha tenido un periodo discontinuo, que podríamos calificar de aproximaciones de la Arqueología a la fotogrametría, pero o los costes o la tecnología no eran adecuados para su implantación. En la figura solo se han representado los trabajos desde 1980 puesto que anteriormente la producción científica de estos trabajos de fotogrametría y arqueologías estaban muy dispersos en el tiempo. El primer trabajo del que se tiene constancia se inició en 1962 “El Proyecto de Cartografía de Teotihuacan” en el Valle de México (Millon, 1964), donde la idea era volar una zona de 20 km². aunque se estima que el yacimiento podría más del doble de superficie, unos 53 km². Este trabajo sigue siendo un referente hoy en día en los inicios de la fotogrametría para la arqueología y es objeto

de estudio (Millon & Altschul, 2015; Cowgill, 2015). Tras este trabajo, aparece un vacío de casi una década, donde en 1970 mediante la fotografía vertical a escala 1:25.000 se descubren Los campos celtas en Himmerland (Dinamarca) (Newcomb, 1971), este puede ser un ejemplo de lo que algunos autores llaman técnicas de la arqueología aérea donde se realiza un reconocimiento de una gran extensión, en este caso se reconoce un antiguo patrón de cultivo celta. Otro ejemplo más cercano podría ser el asentamiento fortificado fenicio-púnico en el litoral de Andalucía oriental denominado Altos de Reveque (Castro et al., 2010). Sin pretender entrar en un profundo debate de esta cuestión ya en los años 70 se plantaba la necesidad del empleo de la fotogrametría en las excavaciones arqueológicas, simplemente citar un autor que afirmaba “Los arqueólogos parecen ignorar en general que si utilizaran una escala cuadrada para las fotografías de sus sitios aumentarían el valor de las fotografías ya que sería posible obtener de ellas planos precisos fotogramétricamente” pero también se afirmaba que “si se toma realiza específicamente para una excavación puede ser costoso” (Hood, 1977). Sin duda esa limitación de costes es lo ha limitado su empleo masivo durante décadas. Sin embargo, claramente se observa una tendencia constante y creciente en la última década, de 2010 a 2019.

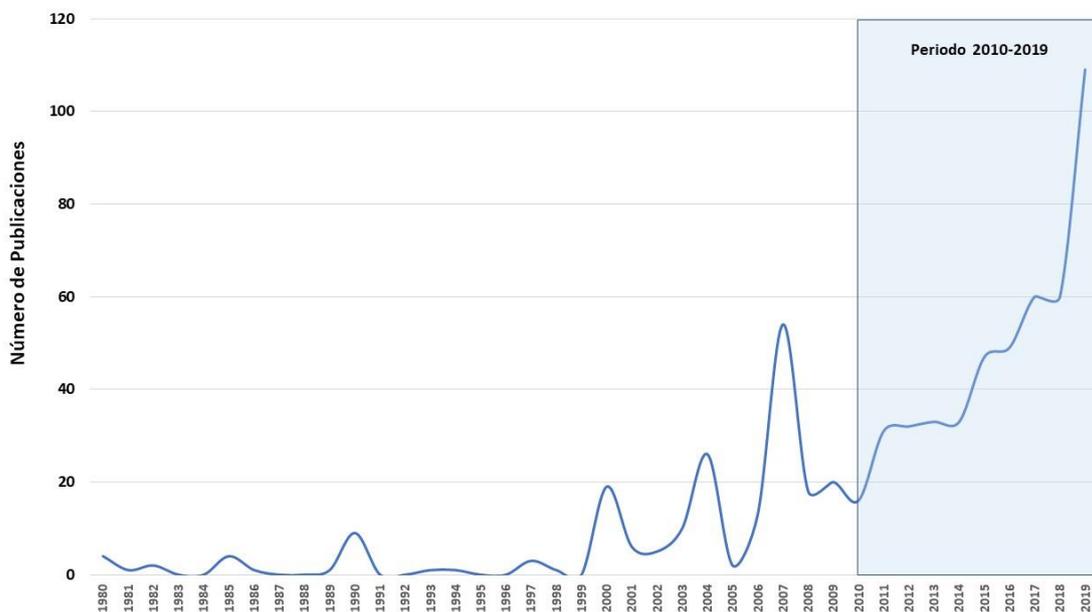


Figura 1. 2. Evolución temporal de la investigación en Fotogrametría y Arqueología

1.4. La Fotogrametría aplicada a la Arqueología: Países y Centros de investigación.

Estas investigaciones las están llevando a cabo instrucciones sobre todo como los organismos centrales de investigación de Francia o Italia, véase figura 1.3, como son CNRS Centre National de la Recherche Scientifique y el Consiglio Nazionale delle Ricerche, respectivamente. En Tercer lugar y destacado estaría una universidad española, la Universidad de Salamanca. Ya con menos de 20 trabajos publicados tenemos los mostrados en la figura 3.

Respecto a estos trabajos hay que destacar que el organismo de Francia tiene una importante apuesta por fotogrametría en la arqueología submarina, como por ejemplo el naufragio del Xelendi fenicio en Malta (Drap et al., 2015), probablemente el naufragio más antiguo conocido en el Mediterráneo occidental. Esta línea de trabajo incluye la fotogrametría submarina en condiciones extremas, por ejemplo, en aguas de alta turbidez, como el trabajo realizado con el pecio romano Arles-Rhone XIII en el río Rhodano (Francia) (Mahiddine et al., 2012); o en aguas

profundas como el proyecto ROV ·D que se encargó del estudio del naufragio romano Cap Bénat 4, a una profundidad de 328m (Drap et al., 2015).

El Consiglio Nazionale delle Ricerche italiano por su parte, destaca en la reconstrucción virtual aplicada a la Arqueología, por ejemplo en su territorio como el de algún edificio de la ciudad de Pompeya, Insula V 1, cuyos datos fueron tomados con laserscan (Dell'Unto et al., 2016), o colaboraciones internacionales como la reconstrucción de un edificio típico llamado Huaca Arco Iris, situado en el complejo del sitio de Chan Chan, un área arqueológica de la UNESCO en Perú (Pierdicca et al., 2016).

Por su parte la investigación española en este campo, liderada por la Universidad de Salamanca, tiene su mayor éxito en el empleo de los drones o UAV como herramienta efectiva y de bajo costo para aplicaciones arqueológicas (Fernández-Hernandez et al., 2015). Uno de los primeros trabajos en este sentido fue en el modelado arqueológico de una curtiduría judía en Ávila (Aguilera et al., 2006).

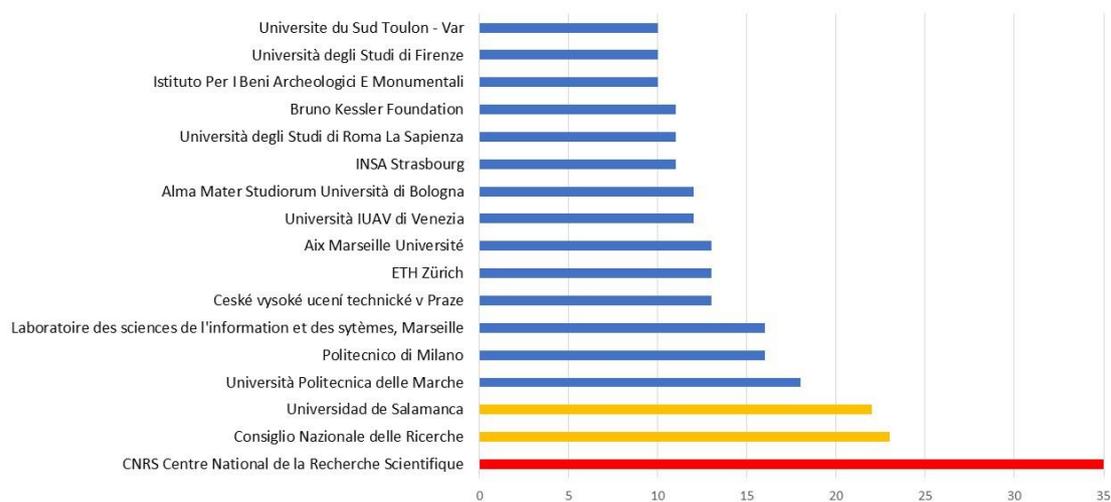


Figura 1. 3. Principales Afiliaciones en la investigación en Fotogrametría y Arqueología

En general esta línea de investigación, como se ha visto en las afiliaciones está liderada por Italia con más de 180 trabajos. Luego habría otro bloque de países Estados Unidos, España, Francia y Reino Unido con un rango entre 50 y 100 trabajos. El tercer bloque de países, con entre 21 y 50 publicaciones, sería Alemania, Grecia, Austria y República Checa. La distribución geográfica de estos trabajos se muestra en la figura 1.4.

Como es de esperar los Estados Unidos presentan una larga tradición en este sentido, de hecho, el primer trabajo registrado es de 1964, el ya citado trabajo de Millón (1964), el proyecto de cartografía de Teotihuacan. Aunque este país destaca en el empleo de los SIG dentro de esta línea de investigación (Neto, 2000), innovando con SIG 3D (Smith et al., 2013) y SIG 4D (Smith et al., 2015), y últimamente explorando las posibilidades de las plataformas on-line como Google Earth en este campo (Liang et al., 2018).

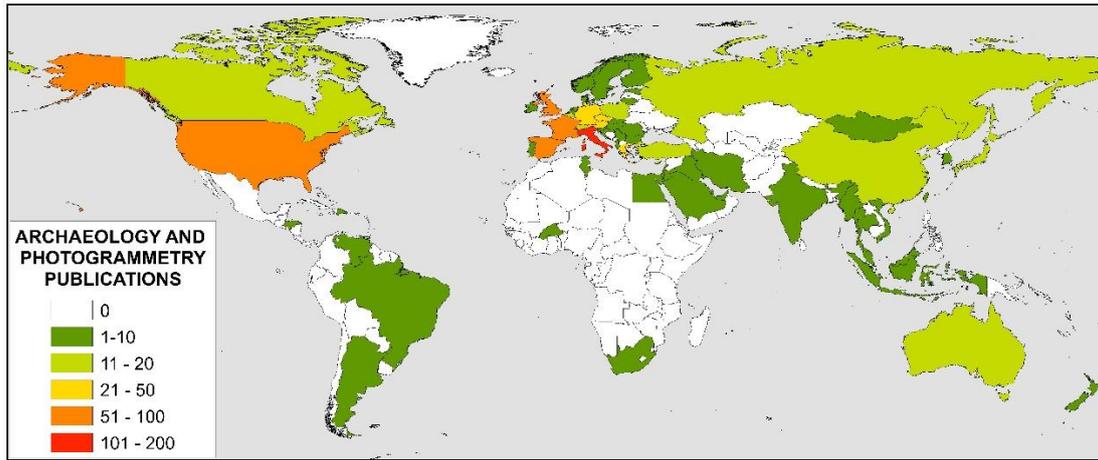


Figura 1. 4. Distribución por países de la investigación en Fotogrametría y Arqueología

1.5. La Fotogrametría aplicada a la Arqueología: Temáticas de investigación

En los trabajos estudiados las líneas de investigación particulares están definidas por las palabras clave de indexación de estos trabajos. En la figura 1.5 se realiza una nube de palabras con todas las palabras clave de estos trabajos, donde el tamaño es indicativo de la frecuencia de aparición. Si no se tienen en cuenta los términos de búsqueda, Photogrammetry y Archaeology, se tiene que las más destacadas son: History, Surveys, Three Dimensional Computer Graphics, Remote Sensing, Cultural Heritages, Cultural Heritage, Architecture y Digital Photogrammetry.

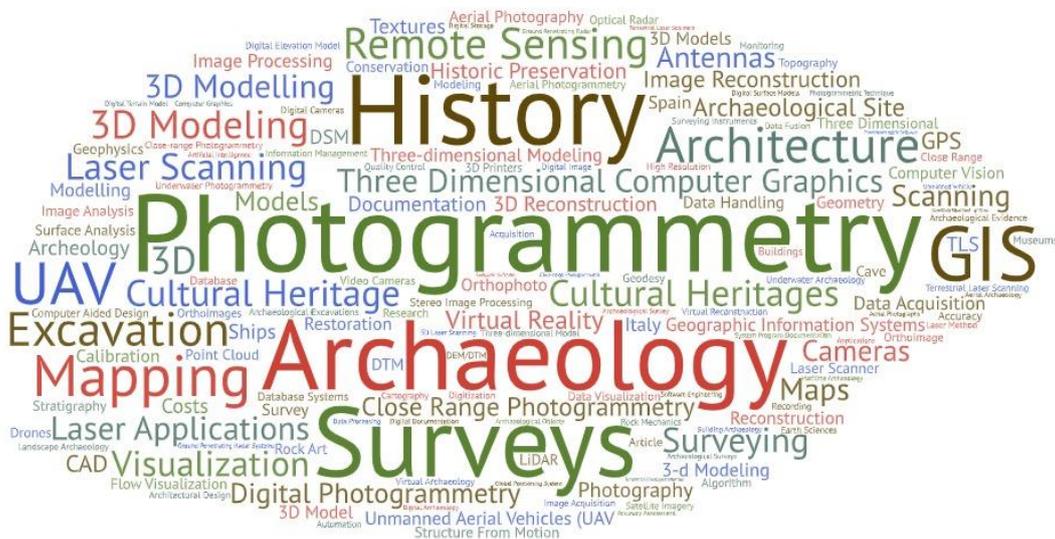


Figura 1. 5. Nube de palabras realizada con las palabras clave de la investigación en Fotogrametría y Arqueología

La evolución de esta investigación a partir del análisis de sus palabras clave, se puede observar en la figura 1.6, y en la tabla 1.1. Se empieza centrando sobre todo en cartografía (mapas) y en sistemas CAD sobre el año 2008, luego en 2010 se va integrando esta información en SIG, se hace reconstrucción virtual, y se plantea como herramienta para el patrimonio cultural. Posteriormente en 2012 ya se hacen gráficos 3D y se emplean los escáneres. En 2014 se combinan los vuelos con UAV y los sistemas Lidar para hacer reconstrucciones 3D, entendemos

Tabla 1. 1. Fotogrametría aplicada a la Arqueología: Evolución de las palabras clave

Año	Keywords
2008	Maps, data base systems, computer aided design modelling
2010	Cultural heritage, image reconstruction, GIS
2012	Three-dimensional computer graph, mapping, scanning
2014	UAV, lidar, 3D reconstruction
2016	Structure from Motion, SfM, virtual archaeology, building archaeology

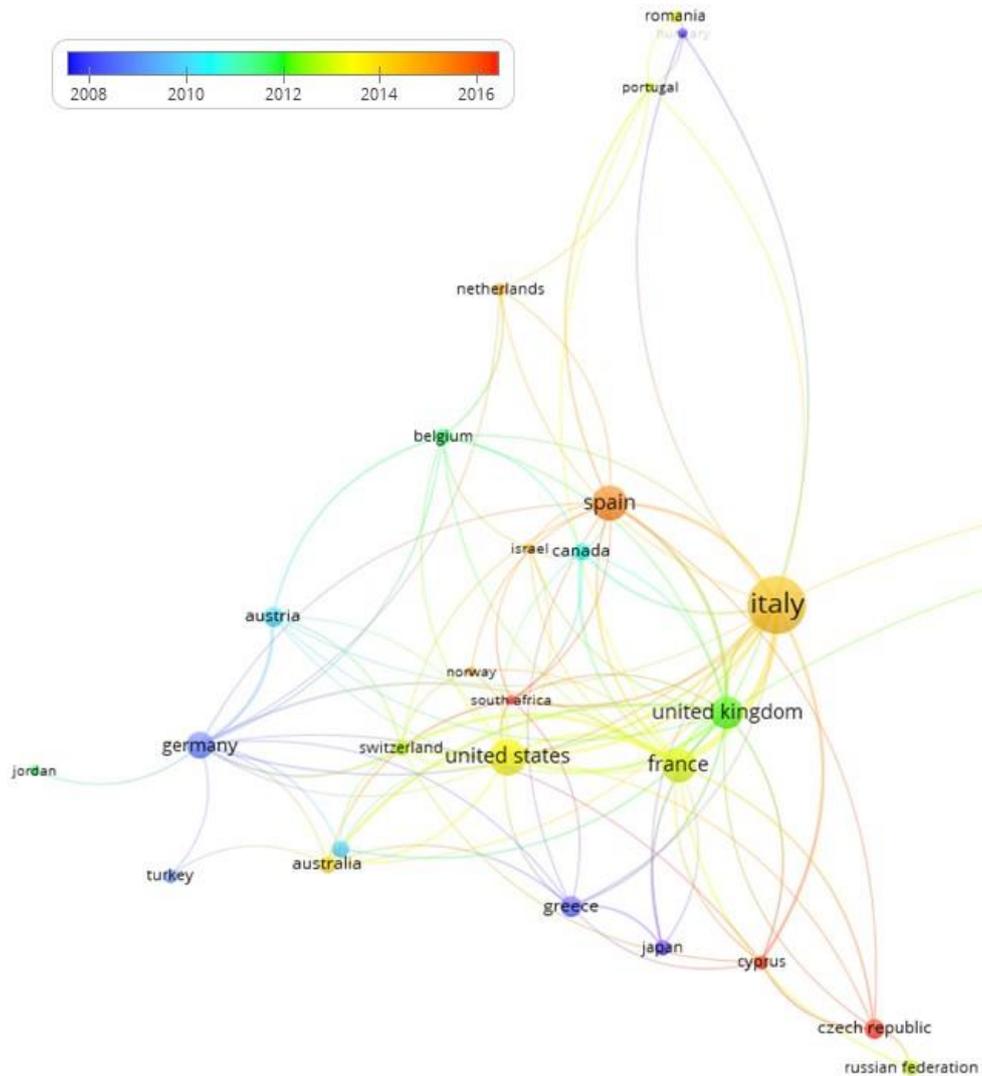


Figura 1. 7. Evolución por países de la investigación en Fotogrametría y Arqueología en términos de Keywords

Por último, este breve análisis bibliométrico, no quedaría completo sin analizar las comunidades científicas entorno a las cuales se integra esta línea de investigación. Para ello se analizan con el SW Vosviewer los clústeres que se obtienen de todas estas publicaciones, ya que ha dado buenos resultados en muchos ámbitos científicos (la Cruz-Lovera et al., 2017). En la figura 1.8 se muestran los 8 clústeres obtenidos, y en la tabla 1 se resumen los mismos, asignándoles un nombre en función de las principales palabras clave obtenidas. Así los clústeres obtenidos son

los relacionados con: fotogrametría de objeto cercano; fotogrametría aérea; Patrimonio cultural; Excavación; cámaras; Laserscan and GPS; Instrumentación; y reconstrucción virtual / impresoras 3D.

El clúster 1 centrado en fotogrametría de objeto cercano o a corta distancia. De los primeros trabajos en este sentido podemos destacar el estudio del Mausoleo del Emperador Qin Shi Huang en 1990, donde se combinaron técnicas de fotografía a corta distancia, fotografía a baja altitud y teledetección (Song et al., 1990). Como dato curioso y que podríamos calificar del inicio de los UAV está el trabajo de Theodoridou et al., (2000), sobre el uso de helicópteros teledirigidos para su aplicación en los estudios arqueológicos y en la industria de la construcción de edificios. La idea fue la creación de un sistema de adquisición de imágenes fotogramétricas a baja altitud, utilizando un helicóptero controlado por radio, y desarrollo de una metodología específica basada en la fotogrametría digital, para el levantamiento rápido y eficaz de sitios arqueológicos, excavaciones y/o monumentos en general. Llama la atención que en el año 2003 todavía se plantease el empleo de globos aerostáticos (inflados con helio) como solución para la adquisición de imágenes a bajo coste comparándolo con vuelos tradicionales. Aquí, con cámaras de 4 Megapíxeles se consiguió una precisión de las imágenes aéreas mejor de 4 cm en posición y altura (Altan et al., 2004).

El clúster 2 centrado en la fotogrametría aérea y el desarrollo de los UAV. Los primeros trabajos importantes con UAV, se puede decir que empiezan con la comparación del DSM (digital Surface model) generados a partir de imágenes de mini UAV y escáner láser terrestre en aplicaciones de patrimonio cultural. Por ejemplo, los estudios de Pinchango Alto, un asentamiento LIP (Período Intermedio Tardío; 1400 d.C.), situado a 400 km al sur de la capital de Perú (Lima), cerca de los famosos geoglifos de Nasca; donde consiguieron 10 cm de resolución con las imágenes de UAV (Eisenbeiss & Zhang, 2006). La comparación en 3D de ambos modelos de elevación muestra un valor medio inferior a 1 cm con una desviación estándar de 6 cm. Los sistemas LiDAR (Light Detection and Ranging) han demostrado una alta capacidad de producir rápidamente Modelos Digitales del Terreno (MDT) incluso bajo la vegetación. Esto en Arqueología ha supuesto un avance muy importante en la exploración de grandes territorios escasamente explorados por las dificultades orográficas o de vegetación. Como ejemplos tempranos tenemos los estudios en Irlanda sobre el asentamiento medieval abandonado de Newtown Jerpoint, el puerto prehistórico de Dún Ailinne o el complejo arqueológico de la Colina de Tara (Corns & Shaw, 2009). Otro trabajo de interés en este sentido fue en la zona arqueológica de Augusta Bagiennorum donde se han realizado diferentes levantamientos desde 1990. Con UAV volando a una altitud de 200 m con una velocidad media de 15 m/s, obtuvieron la precisión de la cartografía tridimensional adecuada para determinar la idoneidad de esta técnica para fines arqueológicos (Bende et al., 2007).

funerario del neolítico (Núñez et al., 2013). Otro ejemplo es en el sitio arqueológico urbano de la Plaza Velarde en Santander, que es una zona de 450 m², para documentar todas las estructuras que aparecían en el sitio arqueológico, se decidió utilizar técnicas de fotogrametría a partir de imágenes de cámaras digitales tomadas desde UAV (Cobos et al., 2015).

El clúster 5 está dedicado a las cámaras, y por tanto entendemos que está más en el Campo de Computers Science o Engineering que de la propia Arqueología, aunque tenga una clara aplicación a este campo. La fotogrametría habitualmente requiere cámaras métricas calibradas para que se pueda realizar todo el proceso de orientación interna, y los pasos alternativos de orientación externa de cada toma de datos, y orientación relativa y orientación absoluta. Luego esta línea de trabajo se centra en sistemas que extraen automáticamente un modelo de superficie 3D texturado a partir de una secuencia de imágenes de una misma escena. El desarrollo de estos sistemas o algoritmos ha permitido emplear ajustes de cámara desconocidos (cámaras no calibradas), e incluso que los parámetros de esta cámara, como el zoom o el enfoque cambien durante la toma de datos (Pollefeys et al., 2000).

El clúster 6 está dedicado al GPS y al Laser Scan. Sobre todo, hay que destacar que en grandes extensiones de terreno el establecimiento de puntos de control para los vuelos fotogramétricos con UAV o integrar los cortes arqueológicos necesitan datos georreferenciados, para que toda la información se pueda integrar en un SIG y analizar posteriormente (Orengo, 2013).

El clúster 7, centrado en la instrumentación, sobre todo en Terrestrial Laser Scanners (TLS). Estas técnicas se han ido combinando con otras como se ha mencionado anteriormente. Como anécdota citar que aquí se incluyen bastantes trabajos de la denominada "*Arqueología Industrial*" que, sin pretender hacer un debate sobre la cuestión, da lugar a la indexación de muchos trabajos con este término de búsqueda dentro de la arqueología. Y aunque no sea objeto de estudio de esta tesis se debe mencionar por rigor de la búsqueda empleada. La arqueología industrial se ocupa de cuestiones de cultura industrial y de la preservación de los monumentos industriales. El concepto se introdujo en 1955 en Inglaterra, después de que el ingeniero suizo Conrad Matschoss ampliara la historia de la tecnología a los monumentos industriales en 1932 (Gruenkemeier, 2008). Evidentemente las técnicas descritas en esta tesis serán de aplicación a la Arqueología, la arqueología industrial, y todas las ciencias que necesiten de la representación tridimensional precisa de objetos georreferenciados.

El último clúster, está centrado en la reconstrucción virtual, y una vez que los modelos son generados, incluso realizar una impresión 3D de los mismos a modo de divulgación científica, o de preservación del patrimonio, pues a veces no es posible exponer el original y se expone una copia del mismo, bien a escala 1:1, bien a otra escala para que se pueda adaptar al lugar de exposición. Por citar algún ejemplo de reconstrucción en 3D a partir de secuencias de imágenes, con el fin de fabricar réplicas digitales (y físicas) foto-realistas para una exposición y para la visualización en 3D en aplicaciones virtuales para museos, se tiene la exposición "Tesoros de la Arqueología y la Cultura de Vietnam", en la que se seleccionaron objetos del patrimonio cultural de diferentes museos de Vietnam, se digitalizó en septiembre de 2015 (Kersten, 2018). Los Tesoros de Vietnam, que nunca fueron exhibidos fuera de Vietnam, se pudieron mostrar por primera vez en Alemania en el contexto de tres exposiciones en las ciudades de Herne, Chemnitz y Mannheim entre octubre de 2016 y febrero de 2018. Esto sin duda permite dar otra dimensión al patrimonio cultural sin ponerlo en riesgo. Como gran ejemplo en España se tiene la réplica de la Cueva de Altamira, la denominada neo cueva que es la que realmente se visita, para preservar la original. A partir de 28 pares de fotografías se obtuvo una representación en relieve muy

exacta. A partir de las imágenes, la fotogrametría permite establecer una precisa cartografía del techo, con curvas de nivel equidistantes 2 cm. La superposición de la cobertura fotográfica permitió posicionar cada una de las pinturas rupestres con gran precisión (Museo de Altamira, 2018).

Tabla 1. 2. Fotogrametría aplicada a la Arqueología: Clústeres de la investigación

Cluster	Peso (%)	Color	Keywords
Fotogrametría de objeto cercano	22.1	Rojo	Digital photogrammetry, three-dimensional modelling, close range photogrammetry, structure from motion, 3D models, GIS
Fotogrametría aérea	20.4	verde	Orthofoto / Orthoimage, lidar, UAV, aerial photography, remote sensing, mapping, Digital elevation models
Patrimonio cultural	13.7	azul	Cultural heritage, architecture, buildings, geographic information systems, computer aided design, historic preservation
Excavación	12.6	amarillo	Three-dimensional computer graphic, History, excavation, cost effectiveness, surveys, 3D modeling
Cámaras	10.9	Morado	3D reconstruction, stereo image processing, CAD, camera calibration, cameras
Laser scan and GPS	8.8	cian	GPS, 3D modelling, reverse engineering, ground control point, SfM, laser scan
Instrumentación	7.7	naranja	Laser applications, surface analysis, terrestrial laser scanning, tls, survey instruments
Reconstrucción virtual / impresora 3D	3.9	marrón	3D printing, 3D printers, image-based modelling, point cloud, virtual reconstruction

1.6. Conclusiones de los antecedentes

En la parte de antecedentes de esta tesis, del estudio bibliométrico podemos concluir que las principales líneas de investigación, identificadas como clústeres son por orden de importancia en cuanto a número de trabajos publicados, los relacionados con: fotogrametría de objeto cercano; fotogrametría aérea; Patrimonio cultural; Excavación; cámaras; Laserscan and GPS; Instrumentación; y reconstrucción virtual / impresoras 3D.

Por tanto, en esta tesis, como se ha indicado en los objetivos vamos a abordar en los siguientes capítulos todas estas líneas de trabajo del siguiente modo:

- el análisis de la fotogrametría aérea con UAV a grandes yacimientos arqueológicos con el empleo de GPS para el establecimiento de la red de puntos de control;
- la fotogrametría de objeto cercano aplicada a cortes de excavación;
- la comparativa entre laserscan (HDS) y fotogrametría de objeto cercano como análisis de la instrumentación más adecuada según el caso de estudio;
- la obtención de ortofotografías y reconstrucción virtual 3D como herramienta de análisis aplicada a la arqueología y como contribución al patrimonio cultural.

No abordándose se forma explícita el tema de las cámaras por considerarlo ya fuera de tema de las aplicaciones.

1.7. Referencias

- Aguilera, D., Lahoz, J., Finat, J., Martínez, J., Fernández, J., & San Josem, J. (2006). Terrestrial laser scanning and low-cost aerial photogrammetry in the archaeological modeling of a Jewish tanneries. *International Archives of Photogram., Remote Sensing*, 38, 5.
- Albertz, J. (2007). A look back. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(5), 504-506. <https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/2007journal/may/lookback.pdf>.
- Altan, M. O., Celikoyan, T. M., Kemper, G., & Toz, G. (2004). Balloon photogrammetry for cultural heritage. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B5), 964-968.
- Bendea, H., Chiabrando, F., Tonolo, F. G., & Marenchino, D. (2007, October). Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV. The Augusta Bagiennorum test site. In *XXI International CIPA Symposium* (Vol. 1).
- Bervoets, S. G. (1969). Review of developments in photogrammetry. *Australian Surveyor*, 22(7), 529-540.
- Bitelli, Gabriele, Maria Alessandra Tini, and Luca Vittuari. (2000) Close-range photogrammetry, virtual reality and their integration in archaeology. Volume 33, 2000, Pages 872-879. 19th International Congress for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS 2000; Amsterdam; Netherlands; 16 July 2000 through 23 July 2000; Code 135636
- Castro, J. L. L., Manzano-Agugliaro, F., & Ochotorena, B. A. (2010). Altos de Reveque: un asentamiento fortificado fenicio-púnico en el litoral de Andalucía oriental. *Archivo español de Arqueología*, 83, 27-46.
- Cobos, Ó. J. C., Rogina, P. S., Vega, L. T., López, Ó. R., Casuso, D. A., Almazán, D. V., & Vidal, E. S. (2015). Virtual documentation of different structures in the urban archaeological site of Velarde Square in Santander. In *2015 Digital Heritage* (Vol. 2, pp. 691-694). IEEE.
- Corns, A., & Shaw, R. (2009). High resolution 3-dimensional documentation of archaeological monuments & landscapes using airborne LiDAR. *Journal of Cultural Heritage*, 10, e72-e77.
- Cowgill, G. L. (2015). The Teotihuacan Mapping Project: experiences with data files, big questions, and some research priorities for Teotihuacan. *Ancient Mesoamerica*, 26(1), 153.
- da Silva, D. C. (2012). EVOLUTION OF PHOTOGRAMMETRY IN BRAZIL. *Revista Brasileira de Cartografia*, 64(4).
- Daakir, M., Pierrot-Deseilligny, M., Bosser, P., Pichard, F., Thom, C., & Rabot, Y. (2016). Study of lever-arm effect using embedded photogrammetry and on-board GPS receiver on UAV for metrological mapping purpose and proposal of a free ground measurements calibration procedure. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 9. Volume 40, Issue 3W4, 17 March 2016, Pages 65-70 European Calibration and Orientation Workshop, EuroCOW 2016; Lausanne; Switzerland; 10 February 2016 through 12 February 2016; Code 121090

- Dell'Unto, N., Landeschi, G., Touati, A. M. L., Dellepiane, M., Callieri, M., & Ferdani, D. (2016). Experiencing ancient buildings from a 3D GIS perspective: a case drawn from the Swedish Pompeii Project. *Journal of archaeological method and theory*, 23(1), 73-94.
- Drap, P., Merad, D., Hijazi, B., Gaoua, L., Nawaf, M. M., Saccone, M., & Castro, F. (2015). Underwater photogrammetry and object modeling: a case study of Xlendi Wreck in Malta. *Sensors*, 15(12), 30351-30384.
- Drap, P., Seinturier, J., Hijazi, B., Merad, D., Boi, J. M., Chemisky, B., & Long, L. (2015). The ROV 3D Project: Deep-sea underwater survey using photogrammetry: Applications for underwater archaeology. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 8(4), 1-24
- Eisenbeiss, H., & Zhang, L. (2006). Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), 90-96.
- Eisenbeiss, H., & Sauerbier, M. (2011). Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications. *The Photogrammetric Record*, 26(136), 400-421.
- Fernández-Hernandez, J., González-Aguilera, D., Rodríguez-González, P., & Mancera-Taboada, J. (2015). Image-based modelling from unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry: an effective, low-cost tool for archaeological applications. *Archaeometry*, 57(1), 128-145.
- Garrido-Cardenas, J. A., Mesa-Valle, C., & Manzano-Agugliaro, F. (2018a). Trends in plant research using molecular markers. *Planta*, 247(3), 543-557.
- Garrido-Cardenas, J. A., Mesa-Valle, C., & Manzano-Agugliaro, F. (2018b). Human parasitology worldwide research. *Parasitology*, 145(6), 699-712.
- Glaser, G. H., & Saliba, M. S. (1972). Application of sparse matrices to analytical photogrammetry. In *Sparse Matrices and Their Applications* (pp. 135-146). Springer, Boston, MA.
- González-Delgado, J. Á., Martínez-Graña, A., Holgado, M., Gonzalo, J. C., & Legoinha, P. (2020). Augmented Reality as a Tool for Promoting the Tourist Value of the Geological Heritage Around Natural Filming Locations: a Case Study in "Sad Hill"(The Good, the Bad and the Ugly Movie, Burgos, Spain). *Geoheritage*, 12, 1-11.
- Grenzdörffer, G. J., Engel, A., & Teichert, B. (2008). The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 31(B3), 1207-1214.
- Gruenkemeier, A. (2008). 3D-documentation technologies for use in industrial archaeology applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37. Volume 37, 2008, Pages 291-295. 2008 21st ISPRS International Congress for Photogrammetry and Remote Sensing; Beijing; China; 3 July 2008 through 11 July 2008; Code 133797
- Hood, J. S. R. (1977). Photogrammetry and field archaeology. *Antiquity*, 51(202), 151.
- Hu, F., Ge, J., Lu, C., Li, Q., Lv, S., Li, Y., ... & Liu, Y. (2020). Obtaining elevation of *Oncomelania hupensis* habitat based on Google Earth and its accuracy evaluation: an example from the Poyang lake region, China. *Scientific Reports*, 10(1), 1-9.

- Inzerillo, L., Leto Barone, F., & Roberts, R. (2019). 3D MODELING OF A COMPLEX BUILDING: FROM MULTI-VIEW IMAGE FUSION TO GOOGLE EARTH PUBLICATION. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- Kersten, T. P. (2018, October). 3D Models and Virtual Tours for a Museum Exhibition of Vietnamese Cultural Heritage Exhibits and Sites. In *Euro-Mediterranean Conference* (pp. 528-538). Springer, Cham. Volume 11196 LNCS, 2018, Pages 528-538. 7th International Conference on Digital Heritage, EuroMed 2018; Nicosia; Cyprus; 29 October 2018 through 3 November 2018; Code 219789.
- Koistinen, K. (2000). 3D Documentation for archaeology during Finnish Jabal Haroun project. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B5/1; PART 5), 440-445.
- la Cruz-Lovera, D., Perea-Moreno, A. J., la Cruz-Fernández, D., Alvarez-Bermejo, J. A., & Manzano-Agugliaro, F. (2017). Worldwide research on energy efficiency and sustainability in public buildings. *Sustainability*, 9(8), 1294.
- Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M., & Villaverde, V. (2010). Terrestrial laser scanning and close-range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37(3), 499-507.
- Liang, J., Gong, J., & Li, W. (2018). Applications and impacts of Google Earth: A decadal review (2006–2016). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 91-107
- Mahiddine, A., Seinturier, J., Boï, D. P. J. M., Drap, P., Merad, D., & Long, L. (2012, September). Underwater image preprocessing for automated photogrammetry in high turbidity water: An application on the Arles-Rhone XIII roman wreck in the Rhodano river, France. In 2012 18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (pp. 189-194). IEEE.
- Meyer, É., Grussenmeyer, P., Tidafi, T., Parisel, C., & Revez, J. (2004, July). Photogrammetry for the epigraphic survey in the great hypostyle hall of Karnak temple: a new approach. In *Proceedings of the XXth Congress of the ISPRS, Istanbul, Turkey* (pp. 12-23).
- Millon, R. (1964). The Teotihuacan mapping project. *American Antiquity*, 345-352.
- Millon, R., & Altschul, J. H. (2015). The making of the map: the origin and lessons of the Teotihuacan Mapping Project. *Ancient Mesoamerica*, 26(1), 135.
- Museo de Altamira. (2018). Consultado 18/07/2020. Disponible on-line <http://www.culturaydeporte.gob.es/mnaltamira/dam/jcr:5acc5e6f-51b4-403c-a0a0-40effcc7cfea/catalogo-el-aerte-de-reproducir-el-arte.pdf>
- Neto, F.A. (2000). 3D modeling and photogrammetry-supported GIS in archaeology. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 33, pp. 574-579.
- Newcomb, R. M. (1971). Celtic fields in Himmerland, Denmark, as revealed by vertical photography at a scale of 1: 25,000. *Photogrammetria*, 27(3), 101-113.
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, 6(1), 1-15.

- Núñez, M. A., Buill, F., & Edo, M. (2013). 3D model of the Can Sadurní cave. *Journal of archaeological Science*, 40(12), 4420-4428.
- Orengo, H. A. (2013). Combining terrestrial stereophotogrammetry, DGPS and GIS-based 3D voxel modelling in the volumetric recording of archaeological features. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, 49-55.
- Perea-Moreno, A. J., Aguilera-Ureña, M. J., Larriva, M. D., & Manzano-Agugliaro, F. (2016). Assessment of the potential of UAV video image analysis for planning irrigation needs of golf courses. *Water*, 8(12), 584.
- Pérez, J. A., Bascon, F. M., & Charro, M. C. (2014). Photogrammetric usage of 1956–57 USAF aerial photography of Spain. *The Photogrammetric Record*, 29(145), 108-124.
- Pierdicca, R., Frontoni, E., Malinverni, E. S., Colosi, F., & Orazi, R. (2016). Virtual reconstruction of archaeological heritage using a combination of photogrammetric techniques: Huaca Arco Iris, Chan Chan, Peru. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 3(3), 80-90.
- Pollefeys, M., Koch, R., Vergauwen, M., & Van Gool, L. (2000). Automated reconstruction of 3D scenes from sequences of images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55(4), 251-267.
- Salmerón-Manzano, E., & Manzano-Agugliaro, F. (2019). Unaccompanied Minors: Worldwide Research Perspectives. *Publications*, 7(1), 2.
- Sauerbier, M., & Eisenbeiss, H. (2010). UAVs for the documentation of archaeological excavations. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(5), 526-531.
- Smith, N. G., Knabb, K., DeFanti, C., Weber, P., Schulze, J., Prudhomme, A., & DeFanti, T. A. (2013, October). ArtifactVis2: Managing real-time archaeological data in immersive 3D environments. In *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)* (Vol. 1, pp. 363-370). IEEE.
- Smith, N. G., Howland, M., & Levy, T. E. (2015). Digital archaeology field recording in the 4th dimension: ArchField C++ a 4D GIS for digital field work. In *2015 Digital Heritage* (Vol. 2, pp. 251-258). IEEE.
- Song, D., Yang, W., & Zhao, P. (1990, August). Photogrammetry and remote sensing project in survey of the Emperor Qin Shi Huang's mausoleum. In *Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision* (Vol. 1395, p. 13952F). International Society for Optics and Photonics.
- Theodoridou, S., Tokmakidis, K., & Skarlatos, D. (2000). Use of radio-controlled model helicopters in archaeology surveying and in building construction industry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B5/2; PART 5), 825-829.
- Valença, J., Júlio, E. N. B. S., & Araújo, H. J. (2012). Applications of photogrammetry to structural assessment. *Experimental Techniques*, 36(5), 71-81.

CAPÍTULO 2

FOTOGRAMETRÍA CON DRON PARA YACIMIENTOS ARQUEOLÓGICOS A GRAN ESCALA: EL CASO DE ÚTICA (TÚNEZ)

Índice

CAPÍTULO 2

2. YACIMIENTOS ARQUEOLÓGICOS A GRAN ESCALA: EL CASO DE ÚTICA (TÚNEZ)	29
2.1. Descripción del yacimiento: relevancia y ubicación	29
2.2. Objetivos	30
2.3. Establecimiento de una red geodésica de control con GPS	30
2.4. Vuelo con UAV	33
2.4.1. Puntos de control. Diseño, materialización y observación.	33
2.4.2. Ejecución del vuelo	36
2.5. Resultados	38
2.5.1. Solapes y recubrimientos obtenidos	38
2.5.2. Procesado de datos: Ortofotografía, plano con curvas de nivel	40
2.6. Conclusiones	47
2.7. Referencias	50

Índice de Figuras

Figura 2.1: Zona Yacimiento. Fuente Google Earth	29
Figura 2.2: Equipo GNSS. Equipo referencia	31
Figura 2.3: Emplazamiento antena referencia GNSS con equipo RTK	32
Figura 2.4: Equipo RTK en punto A, medición campaña 2018	32
Figura 2.5: Toma de puntos en yacimiento y cortes	33
Figura 2.6: GCP previo al vuelo	34
Figura 2.7: Diana para visualización de GCP	34
Figura 2.8: Distribución de GCP en la zona	36
Figura 2.9: Aterrizaje del dron Phantom2 en el área de trabajo.	36
Figura 2.10: Plan de vuelo	37
Figura 2.11: Detalle de la zona de vuelo. Fuente Google Earth	37
Figura 2.12: Fotografías 16 y 36 tomadas desde dron (zona de interés)	38
Figura 2.13: Solape de imágenes	39
Figura 2.14: Esquema comportamiento del solape según orografía	39
Figura 2.15: Flujo de trabajo	40
Figura 2.16: Nube Dispersa	41
Figura 2.17: Posiciones de puntos de control y estimación de errores.	42
Figura 2.18: Nube de puntos densa	44
Figura 2.19: Malla sombreada	45
Figura 2.20: Modelo con textura	46
Figura 2.21: Modelo Digital de elevaciones (MDE)	47
Figura 2.22: Curvas de nivel del yacimiento, a 6m	48
Figura 2.23: Ortomosaico, zona Utica	49

Índice de Tablas

Tabla 2.1:Coordenadas expedición inglesa _____	31
Tabla 2.2: Coordenadas expedición 2018 _____	32
Tabla 2.3: Coordenadas de puntos de control UTM 32N basados en el elipsoide WGS84 ____	35
Tabla 2.4: Errores Puntos de Control en cm y Errores en píxel _____	43

2. Yacimientos arqueológicos a gran escala: El caso de ÚTICA (Túnez)

2.1. Descripción del yacimiento: relevancia y ubicación

El lugar arqueológico que nos llevará a estudio para experimentar con nuestras aplicaciones en la ciencia de la geomática es la antigua ciudad de Útica, es un lugar emblemático para el estudio del mundo fenicio-púnico, ya que es considerada la primera fundación fenicia al Norte de África, de finales del segundo milenio a. C. y contemporánea de Cádiz, según las tradiciones literarias (Moulard, 1924, 1926), y recientemente en excavaciones arqueológicas lo sitúan al menos en el siglo X a. C. (Cardoso et al., 2016; López Castro et al., 2016)

Utica o *Utique* en su versión en francés, es un gran yacimiento arqueológico, con una extensión de 104,051 ha, cuya mayor parte pertenece a la Útica romana (Lézine, 1970). Aunque de acuerdo con las fuentes clásicas, Útica fue, después de Cartago, la más importante ciudad fenicia en Libia, e incluso su fundación fue más antigua, la investigación arqueológica moderna se ha ocupado casi exclusivamente de la ciudad romana (Lézine, 1966, 1968).

Las ruinas de la antigua ciudad de Útica, véase figura 2.1, se localizan junto a la moderna localidad de Henchir-Bou-Chateur. Las distintas investigaciones arqueológicas efectuadas en Útica coinciden en situar el área de la ciudad fenicio-púnica en el extremo Norte de la antigua península que quedaba sobre la margen izquierda del antiguo río Bragradas (Delile et al., 2015). La ciudad fenicio-púnica ocupaba una colina de unas 10 hectáreas cuyo punto más elevado es de 13 metros de altitud. Al Sur y al Oeste de la ciudad las necrópolis que posteriormente fueron cubiertas por las edificaciones romanas que se extienden por una gran superficie, como correspondía a la por mucho tiempo capital de la provincia de África (Jerbania & Redissi, 2014). Este yacimiento se encuentra a 8 km de la costa y sus coordenadas geográficas son 37°3'23.5" N, 10°3'44.13"E y en UTM 32S 594447 4101671. Se ubica a 37 km por carretera de la capital del país, Túnez.

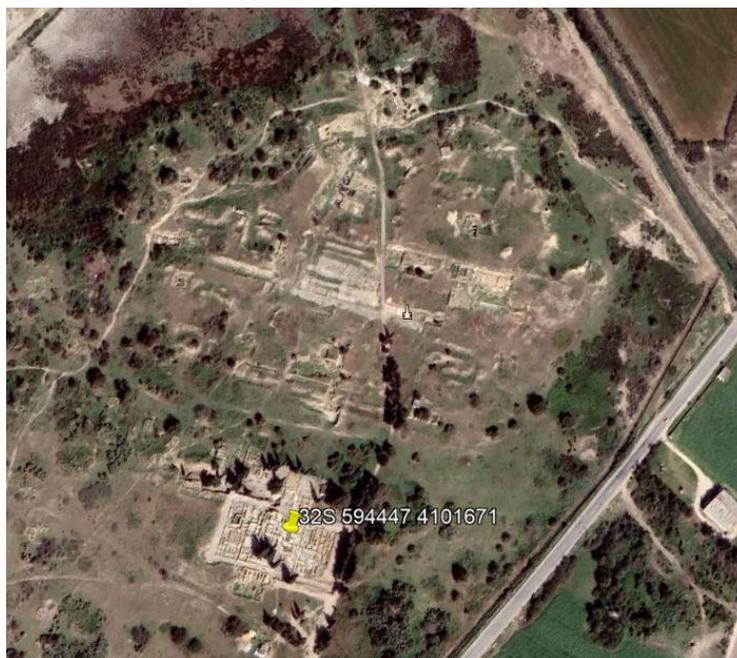


Figura 2.1. Zona del yacimiento de Útica. Fuente Google Earth

2.2. Objetivos

El objetivo de la investigación se plantea cuando en el 2018, se participa en proyecto de investigación, HAR2017-86334-R: El sector *Norte de Utica fenicio-púnica (Túnez): Espacios sagrados, morfología urbana y puerto de comercio (siglos IX a.C.-I d.C.)*, financiados por el *Ministerio de Economía y Competitividad*. Aunque los trabajos de excavación de la misión española empiezan antes, en el año 2010 (López-Castro et al., 2012), y hubo campañas en 2012, 2013 y 2014. Tras todas estas campañas se hace necesario disponer de una cartografía de precisión que permita enlazar todos los trabajos arqueológicos. Por tanto, el objetivo de la investigación llevada a cabo en este sentido fue realizar un levantamiento topográfico de la zona para que aplicando técnicas de la geomática, como la geodesia, fotogrametría, sistemas de información geográfica (SIG), se obtuviese una representación precisa del lugar a escala global para poder ir encajando todas las actuaciones arqueológicas llevadas a cabo en la ciudad de Útica.

2.3. Establecimiento de una red geodésica de control con GPS

La importancia de generar en cada lugar de trabajo una red geodésica viene fundamentado por la necesidad de tener una representación del lugar u objeto lo más real posible tanto en métrica como en ubicación del modelo a representar (San-Antonio-Gómez et al., 2014). El tener todo georreferenciado garantiza la continuidad de los trabajos realizados en diferentes campañas, trabajando siempre en el mismo sistema de coordenadas implementado en origen, e incluso analizar la posible cartografía histórica levantada previamente (San-Antonio-Gómez et al., 2015).

Previamente se realizaron trabajos de implantación de una red de puntos topográficos por parte de las Universidades de Oxford y la Sorbona, obteniéndose unas series de coordenadas, materializadas mediante clavos de acero.

Nuestro objetivo fue elegir unos puntos a los cuales le asignaremos coordenadas con técnicas GNSS, estos puntos serán fijos y nos permitirán volver a la zona y poderlos utilizar encajando trabajos de año en año, si fuese necesario, y así trabajar siempre en el mismo sistema de coordenadas.

Circunstancias especiales encontradas en Túnez, como la orientación de planos, que no es la misma que utiliza el sistema a nivel internacional, la ausencia de vértices geodésicos y de estaciones de referencia permanentes con datos disponibles por internet en las proximidades y la utilización de un modelo de elevación digital global, GTOPO 30, (<http://www6.uniovi.es/~feli/Data/Datos.html>), hacen que se tomen una serie de medidas, como respuesta a estas circunstancias. Se colocó una antena de referencia GNSS propia, (equipo de la marca Leica modelo GPS1200 con RX1250 en bastón, equipo bifrecuencia con precisión centimétrica), véase figura 2.2. Utilizando esta antena de referencia, se realizó la medición de una serie de clavos y puntos señalizados de diversas formas, empleando otro receptor GPS en modo RTK que recibía las correcciones de esta, para poder encajar con levantamientos anteriores. En concreto levantados por una expedición previa de arqueólogos ingleses (Fentress, et al., 2013), se conocían las coordenadas de dos clavos, de acero, Tabla 2.1, localizado en un

foro del yacimiento. Las coordenadas se acordaron expresarlas en UTM sobre el elipsoide WGS84, para no tener problemas con los elipsoides o cartografía locales.



Figura 2.2. Equipo GNSS. Equipo referencia

Tabla 2.1. Coordenadas expedición inglesa

Puntos	Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenadas Z
A	594432.797	4101881.356	50.176
B	594436.962	4101887.370	49.635

En la campaña de 2018, estos dos puntos (A y B) fueron los primeros en medirse. En una zona elevada próxima a la ubicación de dichos puntos se colocó una antena de referencia GNSS figura 2.3, trabajando en modo recolección de datos para post proceso más referencia RTK. Se fijó una coordenada en modo POSAC (fijación de coordenadas del punto en modo navegación). A continuación, se procedió a medir cada uno de los clavos con un equipo móvil RTK, con el bastón fijado a un trípode, realizando 10 mediciones, por cada punto, y promediando, analizando los valores estadísticos obtenidos y eliminando todos aquellos puntos cuyo error excede los 5 mm respecto al error más probable, para mejorar la precisión total.



Figura 2.3. Emplazamiento antena referencia GNSS con equipo RTK

Las coordenadas obtenidas en mayo de 2018 en esos puntos A y B son los citados en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Coordenadas expedición 2018

Puntos	Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenadas Z
A	594434.470	4101883.970	9.777
B	594436.707	4101890.552	9.782



Figura 2.4. Equipo RTK en punto A, medición campaña 2018

Esta medición con dispositivos GNSS es fundamental para establecer un sistema de coordenadas común dentro del yacimiento lo que permite realizar estudios fotogramétricos de detalle y establecer puntos de control, útiles para la restitución de un vuelo fotogramétrico realizado con dron.

Para la representación y cálculo de coordenadas se decidió emplear la proyección UTM, en el HUSO 32N, con DATUM WGS84. Ya que fue lo establecido para el proyecto previamente. También es importante tener este sistema de coordenadas común para todo el yacimiento a la hora de encajar las mediciones locales de detalle que se deberán realizar en los diversos cortes del yacimiento.

La precisión relativa del GPS en principio lleva a unos valores del orden centimétricos, sin embargo, las técnicas de fotogrametría basadas en SfM que se emplearán más adelante pueden generar resultados con precisiones milimétricas, sin embargo, la precisión máxima dependerá de la precisión que tengan los puntos de control, de modo que los puntos medidos con GNSS están limitando la precisión máxima a la que se puede aspirar.



Figura 2.5. Toma de puntos en yacimiento y cortes

2.4. Vuelo con UAV

2.4.1. Puntos de control. Diseño, materialización y observación.

Para tener una representación y métrica de la zona al completo de la excavación se realizó un vuelo fotogramétrico y para ello se necesitaban una serie de puntos de control que dieran una georreferenciación precisa al modelo que obtengamos del yacimiento. Esta medición con dispositivos GNSS nos permite realizar estudios fotogramétricos de detalle y establecer puntos de control, útiles para la restitución de un vuelo fotogramétrico realizado con dron.

Los puntos de control o *Ground Control Points* (GCP), son puntos de referencia que se colocan físicamente en el entorno, en nuestro caso se fotografían desde el aire. Deben ser visibles desde el aire por lo que posteriormente se colocaron dianas en el suelo para ello, para su fácil identificación en las fotografías aéreas. Estos puntos deben de aparecer en varias fotos y su finalidad es generar una correspondencia entre la coordenada del punto y lo que se visualiza en las fotos.

Una vez establecido con anterioridad nuestro sistema de coordenadas se procede a tomar los puntos de control que servirán de apoyo en el proceso fotogramétrico a realizar con dron (UAV

Unnamed Aerial Vehicle). Se realizó un barrido de la zona de interés de la excavación y se amplió hacia el exterior para tener información de posibles zonas de hallazgos en un futuro.

En total se colocaron 25 puntos de control, todos ellos se señalaron con una gavilla, fijada por mortero para su afianzamiento al terreno, véase como ejemplo la figura 2.6, con ello se consigue que dicha señalización sea duradera en el tiempo. El día que se ejecuta el vuelo, previamente se colocan en cada uno de los puntos una diana, figura 2.7, para que con ella sea visible el punto y se pueda reconocer al visualizar las fotos tomadas desde el dron.



Figura 2.6. GCP previo al vuelo



Figura 2.7. Diana para visualización de GCP

En la tabla 2.3 se muestran las coordenadas de los 25 puntos de control UTM 32N en WGS84. Estos puntos de control abarcan 64 ha de la excavación. En esta fase de campo se emplearon un total de 9 horas en señalar, afianzar y medir los 25 puntos que conformarían la red de GCP, para con ello poder obtener posteriormente con las técnicas fotogramétricas un modelo de la zona. En la figura 2.7, se observa la localización de los 25 puntos dentro del yacimiento

arqueológico de UTICA. La precisión relativa del de estos puntos de control levantados mediante GNSS en principio fue centimétrica (Li et al., 2015).

Tabla 2.3. Coordenadas de puntos de control UTM 32N basados en el elipsoide WGS84

Puntos de control	X_{UTM}	Y_{UTM}	Z_H
1	594588.214	4102178.506	2.575
2	594655.366	4102072.039	1.896
3	594770.867	4101874.327	2.828
4	594472.423	4102098.831	3.293
5	594546.546	4101896.384	10.992
6	594653.787	4101693.053	3.747
7	594337.741	4101982.792	3.958
8	594429.529	4101903.790	10.035
9	594593.564	4101617.382	5.154
10	594127.602	4101768.975	3.977
11	594203.341	4101629.031	14.132
12	594327.439	4101528.311	15.098
13	594410.140	4101417.509	13.274
14	593981.522	4101699.059	3.623
15	594086.468	4101583.110	14.598
16	594261.001	4101456.707	37.089
17	594345.362	4101336.126	18.486
18	593884.769	4101490.410	11.154
19	594008.319	4101364.836	17.156
20	594224.430	4101184.667	21.049
21	593772.466	4101168.963	22.949
22	594047.745	4101004.218	18.652
23	593942.004	4100879.223	16.813
24	593734.958	4101079.476	23.418
25	593897.614	4100829.05	14.998

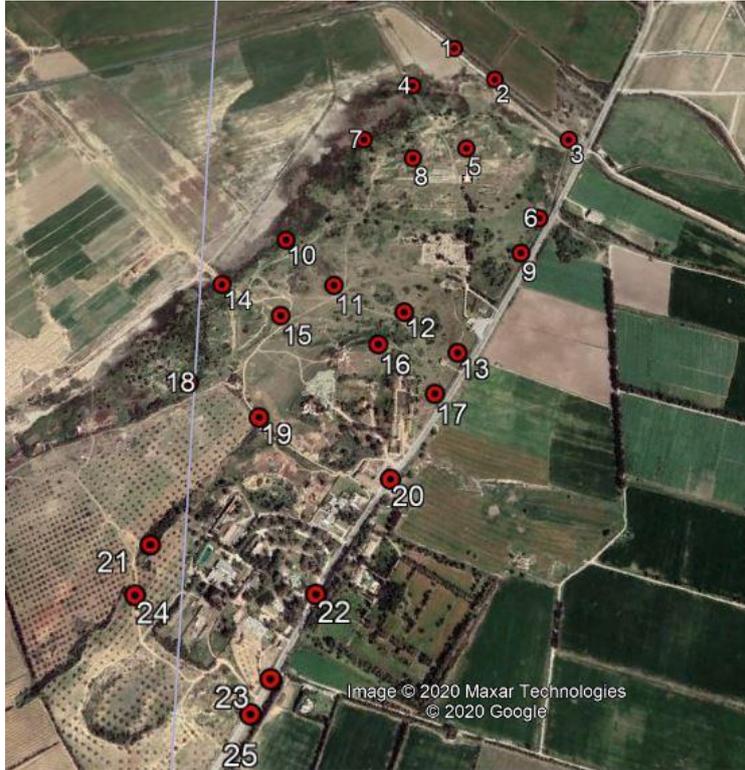


Figura 2.8. Distribución de GCP en la zona

2.4.2. Ejecución del vuelo

El vuelo en la zona se realizó con un dron de la marca Phantom2 con cámara incorporada, modelo FC6310 (8.8mm) con una resolución de 5472x3648, una distancia focal de 8.8 mm y tamaño de píxel de 2.41 x 2.41 micras. No se realizó pre-calibración. En la figura 2.9 se observa el aterrizaje del dron en el área de trabajo.



Figura 2.9. Aterrizaje del dron Phantom2 en el área de trabajo.

Se realizó un plan de vuelo, para obtener fotografías aéreas cumpliendo los requisitos recomendados para este tipo de trabajo, (solape, altura de vuelo e inclinación de la cámara), en función de la resolución buscada (de 3 cm/píxel), véase figura 2.10.

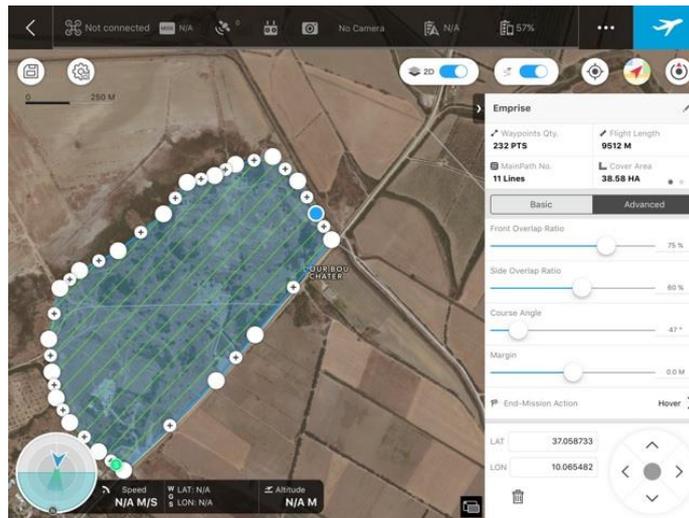


Figura 2.10. Plan de vuelo

Se abarcó el total de la parte del yacimiento de Útica objeto de estudio, aproximadamente 64 ha, aunque fueron finalmente 78,7 ha la superficie volada con el dron. Se obtuvieron con un total de 243 fotos tomadas a una altura media de 135 m sobre el terreno, véase figura 2.11.



Figura 2.11. Detalle de la zona de vuelo. Fuente Google Earth

El análisis final de las fotografías arroja una resolución media de 3.35 cm/píxel, se obtuvieron 226,610 puntos de paso y errores de proyección de 0.594 píxel.

2.5. Resultados

2.5.1. Solapes y recubrimientos obtenidos

La técnica SfM consiste en obtener modelos 3D de objetos o superficies a partir de la toma de fotografías, con un solape recomendado comprendido entre un 60 y un 80%, obteniendo una serie de imágenes no estructuradas, sin cámaras calibradas (Nesbit et al., 2019), véase ejemplo en la figura 2.12. Esta condición de solapamiento viene ya designada cuando se programa el plan de vuelo y con ello se asegura el solapamiento deseado y a su vez la uniformidad de la toma de fotografías (Peña-Villasenín et al., 2019).



Figura 2.12. Fotografías 16 y 36 tomadas desde dron (zona de interés)

El solape final obtenido no fue el deseado inicialmente. En la figura 2.13 se muestran los resultados finales obtenidos, donde la zona en la que el sombreado azul, que sería el de mayor solape, escasea, debido a que en esa parte de la excavación la cota es más elevada que la de partida del vuelo. Por lo que se puede determinar que manteniendo una altura de vuelo constante y al variar la cota del terreno, el aumento de cota en el suelo implica una disminución del solapamiento (Gerke & Przybilla, 2016). El inconveniente principal de la toma de datos es que ese día hubo un viento casi al límite de lo permitido (Liu et al., 2012), pero no se podía retrasar pues la normativa nacional para los vuelos con dron en Túnez, de entrada, prohíbe todos los vuelos con dron en su territorio nacional. Excepcionalmente, y dado el interés nacional por el trabajo, se dio permiso, pero con presencia física del ejército en la toma de datos, vuelo con el dron, y posterior visualización de todas las fotografías por parte del ejército. Tras lo cual se nos devolvió el soporte o tarjeta de información para su posterior procesado.

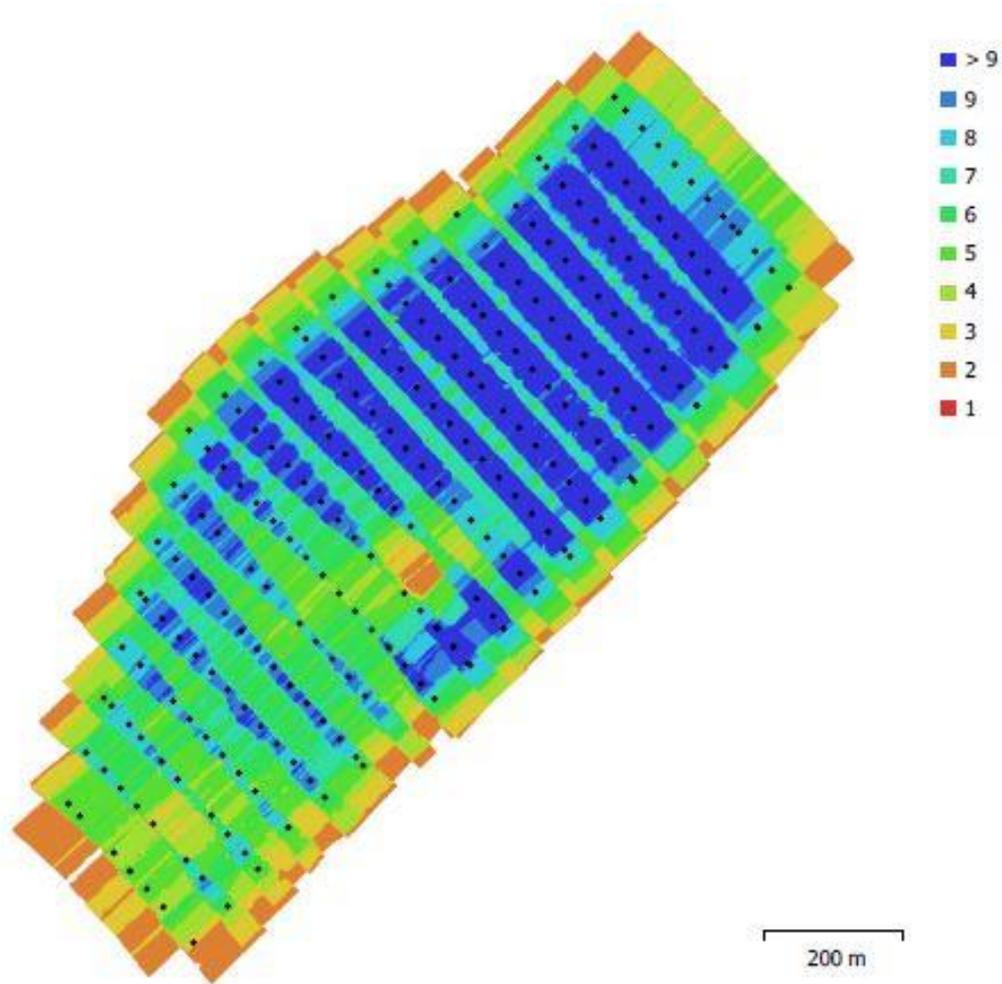


Figura 2.13. Solape de imágenes

Un inconveniente que nos encontramos en este vuelo es que la altura de vuelo fue constante, y no se tiene en cuenta una gran zona elevada, es decir los posibles cambios de la orografía y que influyen en el resultado del solapamiento, véase un ejemplo en figura 2.14. Como se verá más adelante el desnivel relativo entre zonas del yacimiento tiene casi 50 m. Existen trabajos que relacionan estos factores (Torres-Sánchez et al., 2018).

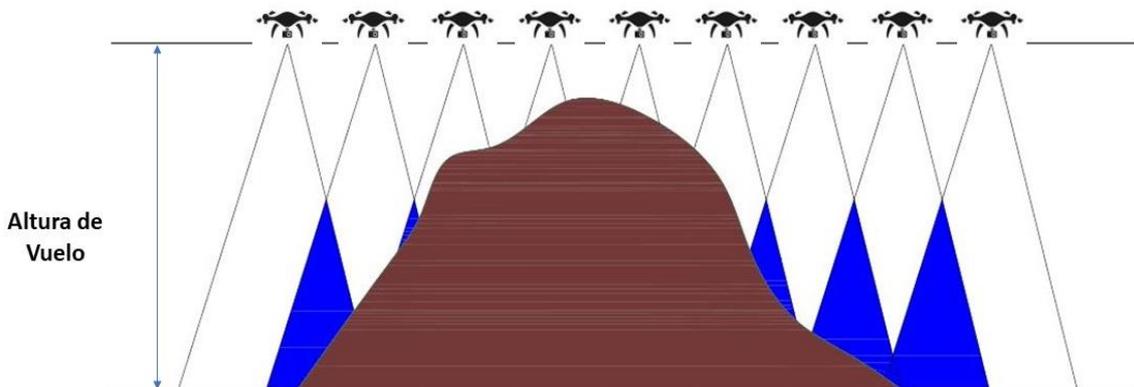


Figura 2.14. Esquema comportamiento del solape según orografía

2.5.2. Procesado de datos: Ortofotografía, plano con curvas de nivel

Para generar un modelo 3D de la zona y posteriormente su ortofoto y modelo digital de elevaciones se utilizó el software Agisoft Photoscan, que demostró ser útil en trabajos previos (Lin et al., 2019), como era denominado al inicio de la investigación, actualmente adopta el nombre de Agisoft Metashape (Mokros et al., 2020). Dicho software realiza una serie de procesos, la mayoría automáticos, por ejemplo, incluye la clasificación de nubes de puntos para personalizar la reconstrucción de la geometría de una forma automática, es decir, distingue entre diversos objetos como edificios y árboles, permitiendo filtrarlos (Han & Hong, 2019). Los procesos básicos para obtener nuestro modelo 3D del yacimiento los expuestos en la figura 2.15:

- Orientar las fotos.
- Colocar y verificar los puntos de control (GCP)
- Reorientar las fotos en base a los puntos de control (Optimizar cámaras)
- Crear nube de puntos densa
- Crear malla
- Crear textura
- Crear modelo digital de elevaciones (MDE)
- Curvas de nivel
- Crear ortofoto

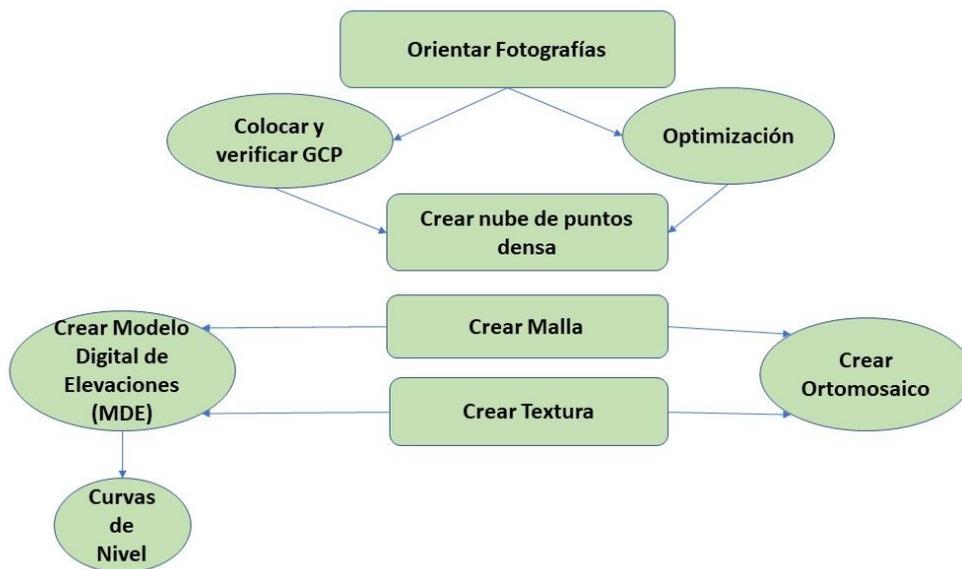


Figura 2.15. Flujo de trabajo

De todos ellos el más importante es la orientación de fotos, basado en el ajuste Bundle, que permite realizar la recolocación espacial tanto de una serie de puntos coincidentes entre imágenes como de las posiciones de las cámaras que tomaron dichas imágenes respecto a la

escena (Barbieux et al., 2016). Con ello se genera una nube de puntos dispersa, véase Figura 2.16: Nube Dispersa.

Una vez orientadas las fotos el resultado es una nube de puntos dispersa. Para poder ajustar y georreferenciar mejor la ubicación de las cámaras, es necesario incorporar una serie de puntos de control (GCP), cada punto deberá aparecer como mínimo en 3 fotos y dichos puntos deben estar distribuidos de modo que abarquen todo el perímetro a levantar y las zonas interiores con objeto de controlar posibles deformaciones (Yun & Yoon, 2018).

- Orientación con precisión alta
- 226.610 puntos



Figura 2.16. Nube Dispersa

Teniendo los 25 puntos importados es el momento de validar cada uno de ellos en todas las fotos para reducir el error lo máximo posible, siendo este proceso el único en el que el técnico toma parte e invierte tiempo, el resto de los procesos son automáticos. Una vez validados todos los puntos el software proporciona una herramienta denominada optimización, que realiza un reajuste de la nube de puntos dispersa y de la alineación de las fotografías para adaptarse a los puntos de control, corrigiendo así posibles deformaciones.

Una vez incorporados al modelo y validado los resultados obtenidos se verifica que los errores obtenidos en el ajuste se encuentran en un rango similar a la precisión que aporta el GNSS RTK utilizado, para la medición de los GCP (Gindraux et al., 2017; Sanz-Ablanedo et al., 2018). En la figura 2.17 se puede apreciar los valores en precisión de cada uno de los 23 puntos, los puntos

22 y 25 se perdieron por lo que no tenemos valores de ellos. El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

La precisión relativa del GNSS en principio aporta unos valores del orden centimétricos, sin embargo, las técnicas de fotogrametría de objetos cercanos, basadas en SfM, que se emplearán más adelante pueden generar resultados con precisiones milimétricas, sin embargo, la precisión máxima dependerá de la precisión que tengan los puntos de control, de modo que dichos puntos, medidos con GNSS están limitando la precisión máxima a la que se puede aspirar.

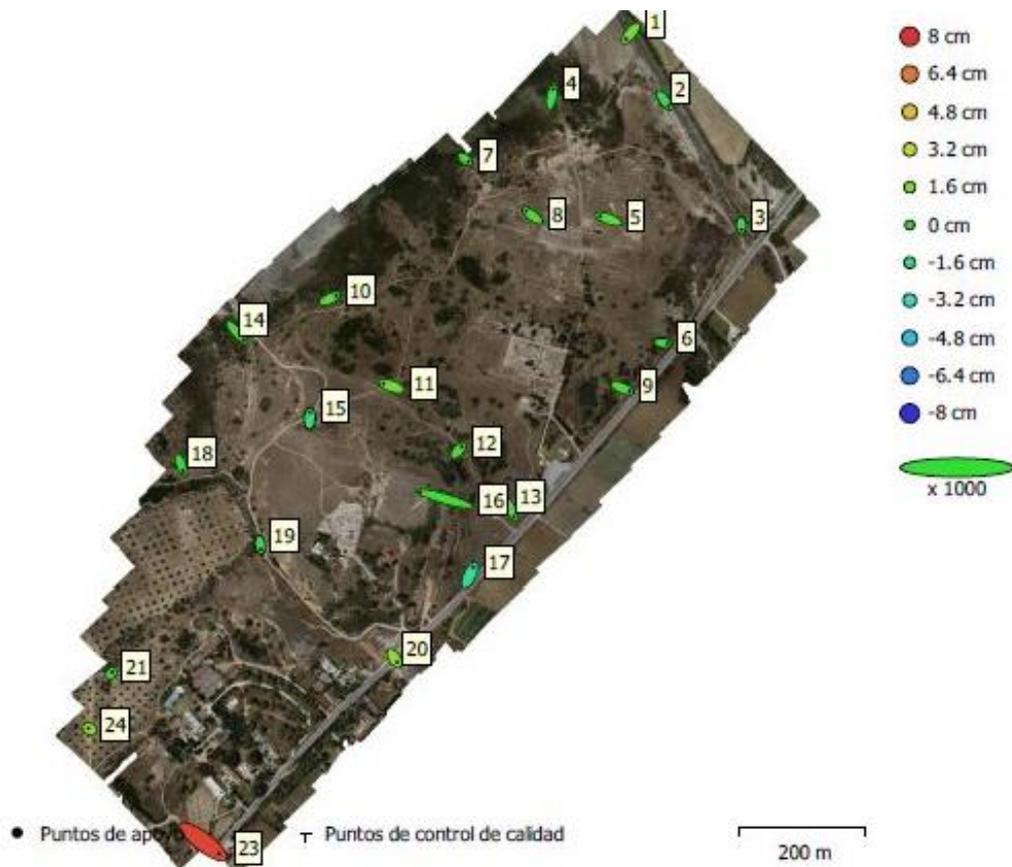


Figura 2.17. Posiciones de puntos de control y estimación de errores. (La elipse de error verde está en mm)

En la tabla 2.4 se reflejan los valores en cm de cada uno de ellos y en cada una de sus coordenadas, al final se indica el error medio cometido en coordenadas x, y, z. En dicha tabla podemos apreciar el error en píxel de cada uno de los GCP.

Tabla 2.4. Errores Puntos de Control en cm y Errores en píxel

Punto marcador	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
3	0.012	-1.227	-0.408	1.293	0.056(7)
21	0.260	0.411	0.216	0.533	0.256(3)
15	0.096	1.868	-1.283	2.268	0.192(11)
13	1.032	-2.229	0.472	2.501	0.134(9)
1	-1.020	-0.862	-0.249	1.359	0.174(3)
2	1.17534	-1.689	-0.188	2.066	0.206(6)
4	0.484	2.280	-0.243	2.343	0.230(6)
5	-2.612	0.909	0.630	2.836	0.301(11)
6	1.351	-0.147	-0.169	1.370	0.284(9)
7	0.874	-0.657	0.125	1.100	0.179(4)
8	-1.810	1.281	0.3716	2.249	0.235(8)
9	2.126	-0.805	0.467	2.320	0.247(6)
10	1.889	0.892	0.549	2.160	0.188(10)
11	-2.266	0.755	0.932	2.564	0.295(6)
12	1.005	1.087	0.456	1.548	0.199(8)
14	1.979	-2.140	0.0865	2.916	0.204(6)
16	-6.730	1.953	-0.005	7.007	0.385(2)
17	0.987	2.441	-1.880	3.235	0.504(11)
18	0.592	-1.863	-0.097	1.957	0.245(7)
19	0.178	-1.366	-0.490	1.462	0.165(8)
20	1.141	-0.837	0.317	1.450	0.236(2)
23	3.420	-3.716	0.7280	5.102	0.653(1)
24	-0.743	-0.056	0.392	0.842	0.344(2)
Error medio Total	2.030	1.605	0.625	2.663	0.262

Terminada la optimización se genera la nube de puntos densa, figura 2.18, y a continuación la malla figura 2.19. En este paso de crear la malla es donde se debe elegir el algoritmo de cálculo, en función del tipo de elemento que se pretende modelar, malla "Bajo relieve" o "arbitraria". Cuando se pretende realizar un procesado de fotogrametría aérea se suele elegir bajo relieve ya que proyecta la superficie sobre un plano horizontal, y arbitrario se selecciona cuando el modelo que se pretende obtener presenta numerosos elementos verticales, entrantes y relieves complejo (Park & Lee, 2019). El algoritmo de cálculo en modo arbitrario es mucho más costoso desde el punto de vista computacional. En el caso de estudio se eligió finalmente arbitrario ya que la zona de interés, al contener los cortes de la excavación y estos estar provistos de salientes, entrantes y elementos en un plano vertical era la mejor opción para obtener un buen resultado.

- Calidad Media
- Cantidad de puntos: 49.835.551 puntos
- Nivel de filtrado: Leve



Figura 2.18. Nube de puntos densa

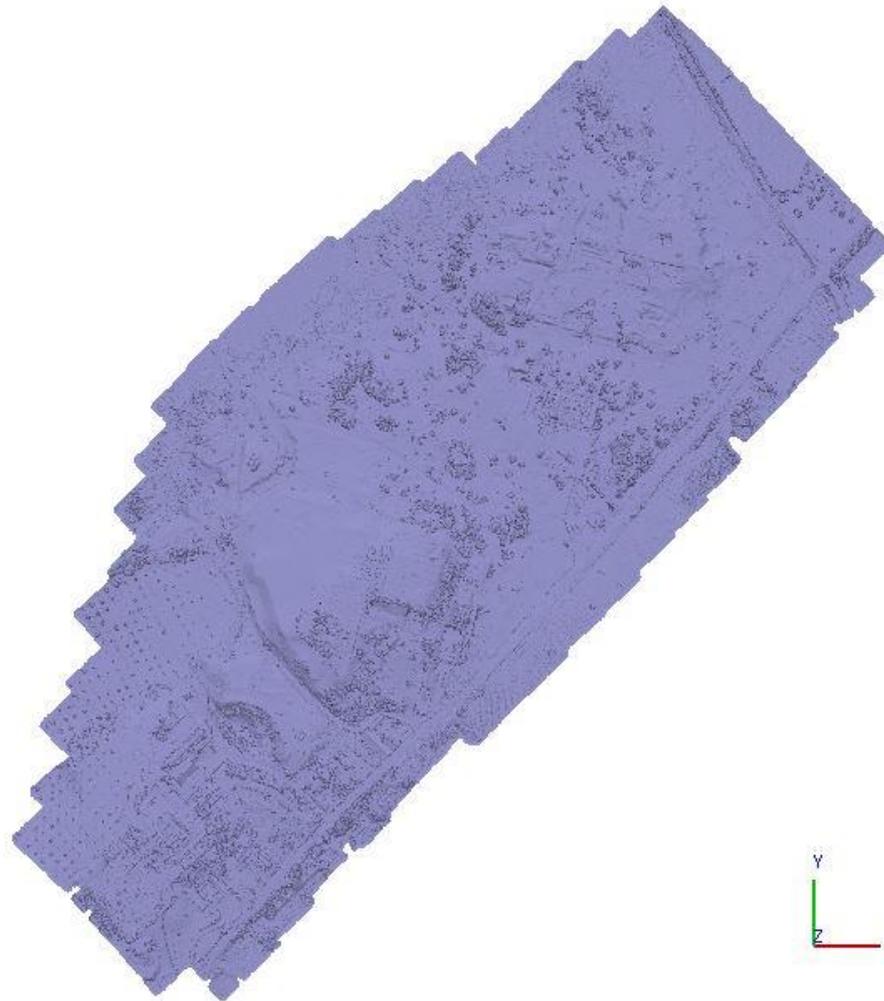


Figura 2.19. Malla sombreada

A partir de aquí ya podemos decir que contamos con un modelo 3D, solo quedaría proporcionarle la textura para que el aspecto adquiriera una visión real. Los siguientes procesos, crear ortofoto y modelo digital de elevaciones son igualmente automáticos y podríamos catalogarlos como posibilidad de obtener distintos resultados e información del modelo obtenido.

Los resultados obtenidos en el proceso fotogramétrico vienen determinados por la nube de puntos densa. La nueva nube está constituida por 49.835.551 puntos (figura 2.18), con ella se puede generar una malla, que en el caso actual arroja un modelo formado por 9.967.110 caras y 4.898.459 vértices (figura 2.19). Con estos resultados obtenidos, a calidad media, nivel de filtrado leve y con parámetros de reconstrucción arbitrario podemos determinar que contamos con un modelo 3D de todo el recinto a estudiar. Para la texturización seleccionamos modelo de mapeado, genérico y modelo de mezcla, mosaico, cuyo resultado se puede apreciar en la figura 2.20.



Figura 2.20. Modelo con textura: Ortofotografía de UTICA

2.6. Conclusiones

La variedad de datos que se pueden exportar, una vez generado un modelo 3D, hace al software Metashape realmente interesante en cuanto a su potencial. El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se genera con una resolución de 0.134 m y un tamaño total en el modelo de 13800 x 15098 píxeles, con una resolución de 13.4 cm/pix y una densidad de puntos de 55.8 puntos/m². Figura 2.21.

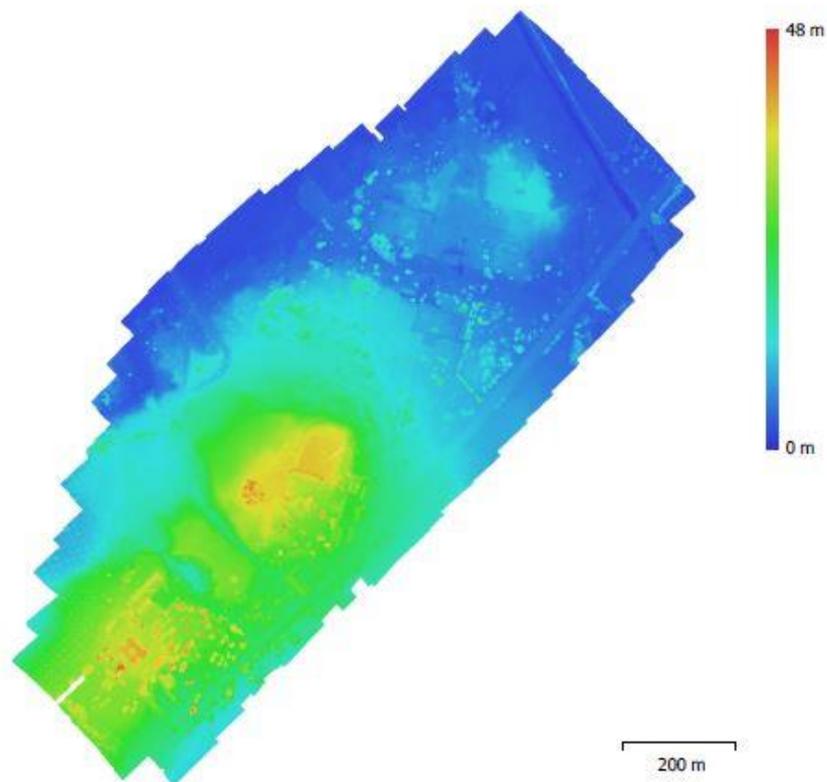


Figura 2.21. Modelo Digital de elevaciones (MDE)

Gracias a la generación del MDE se pueden obtener las curvas de nivel de toda la excavación a través de Metashape, a la equidistancia que se crea oportuna, en la figura 2.22 están representadas a 6m.

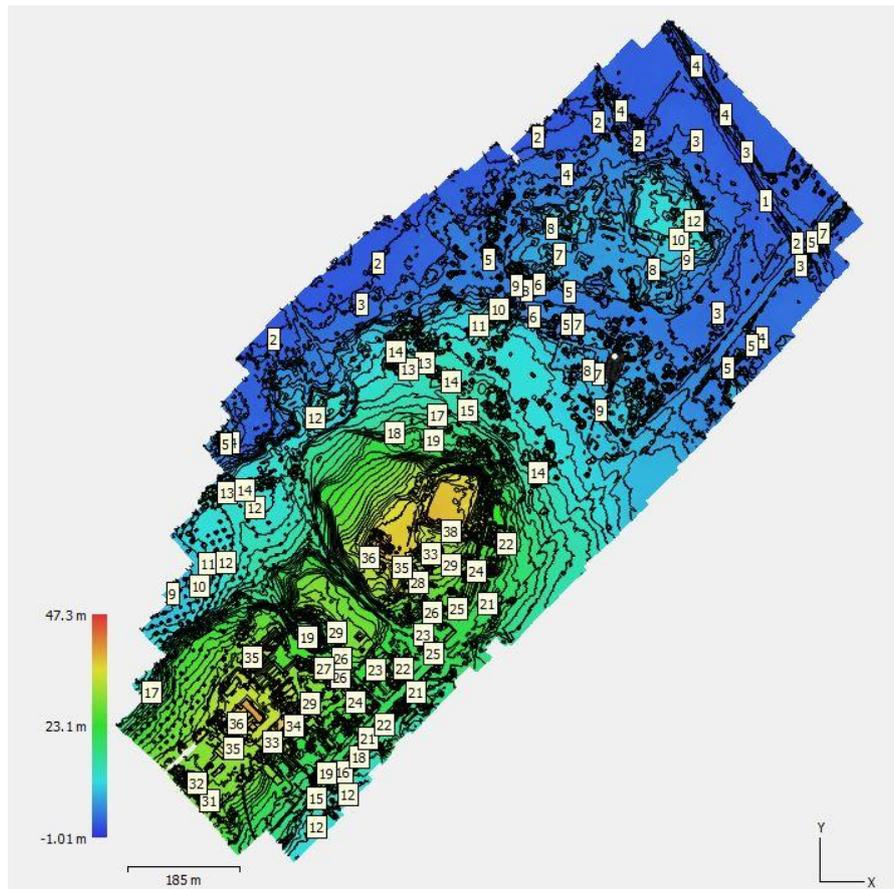


Figura 2.22. Curvas de nivel del yacimiento, a 6m

Uno de los productos más interesantes es la ortofoto, que viene georreferenciada y a escala 1:1, es decir, tan real que la información que se puede consultar en ella es similar a la que se podría obtener directamente en la excavación. El píxel con el que se genera el orto mosaico es de 0.034 m tanto en x como en y. Figura 2.23.



Figura 2.23: Ortomosaico, zona Útica

A modo de conclusión general de este capítulo podemos afirmar que actualmente, los costes fotogramétricos se están reduciendo gracias al empleo de los UAV o drones y que por otro el software para el procesamiento de datos también lo está permitiendo. Recordemos lo costoso que sería un vuelo fotogramétrico tradicional y su restitución con estereocomparadores. Por lo tanto, las nuevas aplicaciones son más fáciles de utilizar y pueden emplearse para diferentes propósitos que no eran típicos al principio, por ejemplo, en la realización de la cartografía de yacimientos arqueológicos.

En este capítulo se ha visto como incluso en unas condiciones muy adversas, tanto por la climatología como el viento casi de 20 m/s, como por la orografía irregular del yacimiento con desniveles importantes de casi 50 m, se ha conseguido una resolución media de 3.35 cm/píxel. Hay que resaltar que gran parte del éxito de la misión cartográfica ha sido el establecimiento de una red de puntos de control con GPS en RTK que ha permitido su buena identificación en el procesado del modelo.

En general se puede afirmar que los mapas tridimensionales resultantes y la Ortofotografía obtenida mejoran el resultado gráfico y la distribución espacial de los levantamientos previos, tanto los realizados con GPS, como por otros métodos tradicionales propios en arqueología (cinta métrica, niveles, cuadrículas, etc.). Esta información ayudará a manejar e integrar el resto de información gráfica a otras escalas y permitirá la obtención de un análisis del conjunto arqueológico.

2.7. Referencias

- Barbieux, K., Constantin, D., & Merminod, B. (2016). CORRECTION OF AIRBORNE PUSHBROOM IMAGES ORIENTATION USING BUNDLE ADJUSTMENT OF FRAME IMAGES. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Bertrand_Merminod/publication/307530861_CORRECTION_OF_AIRBORNE_PUSHBROOM_IMAGES_ORIENTATION_USING_BUNDLE_ADJUSTMENT_OF_FRAME_IMAGES/links/58909f75aca272f9a556ba3d/CORRECTION-OF-AIRBORNE-PUSHBROOM-IMAGES-ORIENTATION-USING-BUNDLE-ADJUSTMENT-OF-FRAME-IMAGES.pdf
- Cardoso, J. L., Castro, J. L. L., Ferjaoui, A., Martín, A. M., Hahn Müller, V. M., & Jerbania, I. B. (2016). What the people of Utica (Tunisia) ate at a banquet in the 9th century BCE. Zooarchaeology of a North African early Phoenician settlement. *Journal of archaeological science: reports*, 8, 314-322.
- Delile, H., Abichou, A., Gadhoun, A., Goiran, J. P., Pleuger, E., Monchambert, J. Y., ... & Ghazzi, F. (2015). The geoarchaeology of Utica, Tunisia: The paleogeography of the Mejerda Delta and hypotheses concerning the location of the ancient harbor. *Geoarchaeology*, 30(4), 291-306.
- Fentress, E., Ghazzi, F., Quinn, J., & Wilson, A. I. (2013). Excavations at Utica by the Tunisian-British Utica Project 2012. Disponible en https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:f0070380-0fea-4aab-b020-cc072aaccd8c/download_file?file_format=pdf&safe_filename=Utica%2BReport%2B2012.pdf&type_of_work=Report
- Gerke, M., & Przybilla, H. J. (2016). Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2016(1), 17-30.
- Gindraux, S., Boesch, R., & Farinotti, D. (2017). Accuracy assessment of digital surface models from unmanned aerial vehicles' imagery on glaciers. *Remote Sensing*, 9(2), 186.
- Han, S., & Hong, C. K. (2019). Assessment of Parallel Computing Performance of Agisoft Metashape for Orthomosaic Generation. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 37(6), 427-434.
- Jerbania, I. B., & Redissi, T. (2014). Utique et la Méditerranée centrale à la fin du IXe s. et au VIIIe s. av. J.-C.: les enseignements de la céramique grecque géométrique. *Utique et la Méditerranée centrale à la fin du IXe s. et au VIIIe s. av. J.-C.: les enseignements de la céramique grecque géométrique. Rivista di Studi Fenici*, (42), 177-204

- Lézine, A. (1966) Utique, notes de topographie. In R. Chevallier (ed.) Mélanges d'archéologie et d'histoire offerts à André Piganiol vol. 3: 1241-1255. Paris, S.E.V.P.E.N. Lézine, A. (1968) Carthage. Utique. Études d'architecture et d'urbanisme. Paris, Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique.
- Lézine, A. (1970) Utique. Tunis, Société Tunisienne de Diffusion.
- Li, X., Ge, M., Dai, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J., & Schuh, H. (2015). Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. *Journal of Geodesy*, 89(6), 607-635.
- Lin, J., Wang, R., Li, L., & Xiao, Z. (2019, July). A workflow of SfM-based digital outcrop reconstruction using Agisoft PhotoScan. In *2019 IEEE 4th International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)* (pp. 711-715). IEEE
- Liu, C., McAree, O., & Chen, W. H. (2012, September). Path following for small UAVs in the presence of wind disturbance. In *Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control* (pp. 613-618). IEEE.
- López Castro, A. Ferjaoui, J.A. Peña Ruano, T. Teixidó, Ullod, M. Ghazouami, A. Adroher, M. Ben Nejma (2012). Proyecto Utica. Informe de los trabajos arqueológicos efectuados en la ciudad fenicio-púnica de Utica (Túnez). Campaña de 2010. *Informes y Trabajos*, (7), 360-371.
- López Castro, Ferjaoui, I. Ben Jerbania, K. Jendoubi, E. Ferrer Albelda, I. Fumadó Ortega, V. Martínez Hahn Müller, C.A. Pardo Barrionuevo, A. Sánchez Moreno, I. Fumadó Ortega, A. Mederos Martín, S. Carpintero Lozano, C. Dhibi, G. Maldonado López, B. Mora Serrano, A. Niveau de Villedary, V. Peña Romo, I. Souissi, W. Khalfalli, L.A. Ruiz Cabrero, F. Dridi, F. y Essaadi. Proyecto Utica. Exc. avaciones en la ciudad fenicio-púnica. Campañas de 2013 y 2014. *Informes y trabajos*, 12 (2015), pp. 259-280.
- San-Antonio-Gómez, C., Velilla, C., & Manzano-Agugliaro, F. (2014). Urban and landscape changes through historical maps: The Real Sitio of Aranjuez (1775–2005), a case study. *Computers, environment and urban systems*, 44, 47-58.
- López Castro, A. Ferjaoui, A. Adroher, F. Arbi, I. Ben Jerbania, F. Dridi, F. Essaadi, E. Ferrer Albelda, I. Fumadó, V. Martínez Hahn Müller, A. Mederos, C.A. Pardo Barrionuevo, V. Peña Romo, A. Sánchez Moreno. Proyecto Útica. Investigación en la ciudad fenicio-púnica. *Informe y trabajos*, 11 (2014), pp. 201-219
- López Castro, J. L., Ferjaou, A., Mederos Martín, A., Martínez Hahn Müller, V., & Jerbania, I. B. (2016). La colonización fenicia inicial en el Mediterráneo Central: nuevas excavaciones arqueológicas en Utica (Túnez). *Trabajos de Prehistoria* 73 (1), 68-89
- Mokros, M., Hollaus, M., Wang, Y., & Liang, X. (2020, May). SFM-Forest-Benchmark project: The benchmarking of image-based point cloud for forest inventory. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 5822).

- Moulard, J. (1924) Fouilles et découvertes à Utique. Bulletin archéologique du Comité des travaux historiques et scientifiques : 141-156.
- Moulard, J. (1926) Fouilles à Utique en 1925. Bulletin archéologique du Comité des travaux historiques et scientifiques : 225-235.
- Nesbit, P. R., & Hugenholtz, C. H. (2019). Enhancing UAV–SfM 3D model accuracy in high-relief landscapes by incorporating oblique images. *Remote Sensing*, 11(3), 239
- Park, H., & Lee, D. (2019). Comparison between point cloud and mesh models using images from an unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 138, 461-466.
- Peña-Villasenín, S., Gil-Docampo, M., & Ortiz-Sanz, J. (2019). Professional SfM and TLS vs a simple SfM photogrammetry for 3D modelling of rock art and radiance scaling shading in engraving detection. *Journal of Cultural Heritage*, 37, 238-246.
- San-Antonio-Gómez, C., Velilla, C., & Manzano-Agugliaro, F. (2015). Photogrammetric techniques and surveying applied to historical map analysis. *Survey Review*, 47(341), 115-128.
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018). Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*, 10(10), 1606.
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Borra-Serrano, I., & Peña, J. M. (2018). Assessing UAV-collected image overlap influence on computation time and digital surface model accuracy in olive orchards. *Precision Agriculture*, 19(1), 115-133.
- Yun, B. Y., & Yoon, W. S. (2018). A Study on the Improvement of Orthophoto Accuracy According to the Flight Photographing Technique and GCP Location Distance in Orthophoto Generation Using UAV. *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, 21(6), 345-354.

CAPÍTULO 3
TÉCNICAS GEOMÁTICAS APLICADAS A LOS
CORTES ARQUEOLOGICOS
EN LA CIUDAD DE ÚTICA (TÚNEZ)

Índice

CAPÍTULO 3

3. TÉCNICAS GEOMÁTICAS APLICADAS A LOS CORTES ARQUEOLOGICOS EN LA CIUDAD DE ÚTICA (TÚNEZ).....	60
3.1. Introducción: Cortes Arqueológicos	60
3.2. Situación de los cortes arqueológicos estudiados	61
3.3. Metodología	63
3.3.1 Establecimiento de puntos de control de cada corte.....	63
3.3.2 Georreferenciación de los puntos de control de cada corte	65
3.3.3. Metodología para la Toma de Fotografías	65
3.3.4. Procesado de Información	67
3.3.5. Modelo 3D	71
3.4. Resultados de Ortofotografía y Modelo Digital de Elevaciones del corte 20	72
3.5. Resultados del Corte10.....	76
3.6. Resultado Corte 11.....	91
3.7. Resumen de resultados de Cortes	112
3.8. Conclusiones	113
3.7. Referencias	114

Índice de figuras

Figura 3.1. Ubicación Yacimiento Útica _____	61
Figura 3.2. Sectores de estudio en el año 2010 en el Yacimiento Útica _____	62
Figura 3.3. Ubicación de los cortes y ejemplos de prospección geofísica _____	63
Figura 3.6. Toma de fotografías. Corte 20 _____	66
Figura 3.7. Disposición de cámaras. Corte 20 _____	67
Figura 3.8. Solape. Corte 20 _____	67
Figura 3.9. Nube de puntos dispersa. Corte 20 _____	68
Figura 3.10. Puntos GCP. Corte 20 _____	69
Figura 3.11. Validación Puntos de control. Corte 20 (La elipse verde de error está en mm) _____	69
Figura 3.12. Nube de puntos densa. Corte 20 _____	71
Figura 3.13. Malla sombreada. Corte 20 _____	72
Figura 3.14. Modelo con textura. Corte 20 _____	72
Figura 3.15. MDE. Corte 20 _____	73
Figura 3.16. Curvas de nivel en MDE y Ortomosaico _____	74
Figura 3.17. Ortomosaico. Corte 20 _____	74
Figura 3.18. Ortofoto y MDE representado en QGIS. Corte 20 _____	75
Figura 3.19. Disposición de cámaras _____	77
Figura 3.20. Solape. Corte 10-sector 1 _____	77
Figura 3.21. Nube dispersa. Corte 10-sector 1 _____	78
Figura 3.22. Posiciones de GCP y estimación de errores _____	78
Figura 3.23. Nube de puntos densa. Corte 10-sector 1 _____	79
Figura 3.24. Malla sombreada. Corte 10-sector 1 _____	80
Figura 3.25. Modelo con textura. Corte 10-sector 1 _____	81
Figura 3.26. Vistas del modelo con textura. Corte 10-sector 1 _____	81
Figura 3.27. A) MDE. B) MDE con sombreado de Relieve. Corte 10-sector 1 _____	82
Figura 3.28. Curvas de nivel a 0.5m en MDE _____	82
Figura 3.29. Ortomosaico. Corte 10-sector 1 _____	83
Figura 3.30. Comparativa métrica en QGIS _____	83
Figura 3.31. Medición de un lateral del corte 10-sector 1 _____	84
Figura 3.32. Disposición de las cámaras. Corte 10-sector 2 _____	84
Figura 3.33. Solape. Corte 10-sector 2 _____	85
Figura 3.34. Nube de puntos dispersa. Corte 10-sector 2 _____	86
Figura 3.35. Posiciones de marcadores y estimaciones de errores _____	86
Figura 3.36. Nube de puntos densa. Corte 10-sector 2 _____	87
Figura 3.37. Malla sombreada. Corte 10-sector 2 _____	88
Figura 3.38. Modelo con textura. Corte 10-sector 2 _____	88
Figura 3.39. MDE. Corte 10-sector 2 _____	89
Figura 3.40. MDE con sombreado. Corte 10-sector 2 _____	89
Figura 3.41. Curvas de nivel a 0.5m. Corte 10-sector 2 _____	90
Figura 3.42. Ortomosaico. Corte 10-sector 2 _____	90
Figura 3.43. Ortomosaico en QGIS con comparativa de coordenadas _____	91
Figura 3.44. Disposición de cámaras. Corte 11- sector C _____	92
Figura 3.45. Solape. Corte 11-sector C _____	92
Figura 3.46. Nube de puntos dispersa. Corte 11-sector C _____	93

Figura 3.47. Posiciones de GCP y estimación de errores. Corte 11-sector C _____	94
Figura 3.48. Nube de puntos densa. Corte 11-sector C _____	95
Figura 3.49. Malla sombreada. Corte 11-sector C _____	96
Figura 3.50. Modelo con textura. Corte 11-sector C _____	96
Figura 3.51. MDE. Corte 11-sector C _____	97
Figura 3.52. Curvas de nivel a 0.2m. Corte 11-sector C _____	97
Figura 3.53. Ortomosaico. Corte 11-sector C _____	98
Figura 3.54. Comparativa métrica en QGIS _____	98
Figura 3.55. Distribución de cámara. Corte 11-sector D _____	99
Figura 3.56. Solape. Corte 11-sector D _____	99
Figura 3.57. Nube de puntos dispersa. Corte 11-sector D _____	100
Figura 3.58. Posiciones de GCP. Corte 11-sector D _____	100
Figura 3.59. Nube de puntos densa. Corte 11-sector D _____	102
Figura 3.60. Malla sombreada. Corte 11-sector D _____	102
Figura 3.61. Modelo con textura. Corte 11-sector D _____	103
Figura 3.62. Distintas vistas del modelo con textura. Corte 11-sector D _____	103
Figura 3.63. MDE con relieve. Corte 11-sector D _____	104
Figura 3.64. Curvas de nivel en el MDE. Corte 11-sector D _____	104
Figura 3.65. Ortomosaico. Corte 11-sector D _____	105
Figura 3.66. Digitalización del Corte 11-sector D con QGIS _____	105
Figura 3.67. Alzados. Corte 11-sector D _____	106
Figura 3.68. Disposición de cámaras. Corte 11-sector F _____	106
Figura 3.69. Solape de las imágenes. Corte 11-sector F _____	107
Figura 3.70. Nube de puntos dispersa. Corte 11-sector F _____	107
Figura 3.71. Posiciones y estimación de errores de los GCP. Corte 11-sector F _____	108
Figura 3.72. Nube de puntos densa. Corte 11-sector F _____	109
Figura 3.73. Malla sombreada. Corte 11-sector F _____	109
Figura 3.74. Modelo con textura. Corte 11-sector F _____	110
Figura 3.75. MDE. Corte 11-sector F _____	110
Figura 3.76. Curvas de nivel a 0.5m. Corte 11-sector F _____	111
Figura 3.77. Ortomosaico. Corte 11-sector F _____	111
Figura 3.78. Vistas 3D de modelo con textura. Corte 11-sector F _____	112

Índice de Tablas

Tabla 3.1. Coordenadas relativas en metros. Corte 20	64
Tabla 3.2. Coordenadas UTM. Corte 20	65
Tabla 3.3: Errores de puntos de apoyo o marcadores. Corte20	70
Tabla 3.4: Comparativa de Coordenadas UTM entre Estación Total y QGIS. Corte 20	75
Tabla 3.5. Errores de GCP. Corte 10-sector 1	79
Tabla 3.6. Errores de GCP. Corte 10-sector 2	87
Tabla 3.7. Errores de GCP. Corte 11-sector C	94
Tabla 3. 9. Errores de GCP. Corte 11-sector F	108
Tabla 3.10. Resultado SfM de los Cortes	112

3. TÉCNICAS GEOMÁTICAS APLICADAS A LOS CORTES ARQUEOLÓGICOS EN LA CIUDAD DE ÚTICA (TÚNEZ)

3.1. Introducción: Cortes Arqueológicos

Desde que se comienzan los trabajos de excavación en un yacimiento, hasta que el arqueólogo llega al laboratorio para analizarlos o comienza a recabar toda la información obtenida en campo, puede pasar mucho tiempo. Por ello la metodología y técnicas que se emplean en todo lo que conlleva la recopilación de: extractos, datos, piezas y demás, debe ser muy minuciosa y con la mayor precisión y orden que se pueda tener (Barker, 1993).

Inicialmente la recopilación de hallazgos arqueológicos consistía en registrar y dibujar manualmente (Collis, 1996). Cuando la fotografía se pone en uso, se toman fotos que acompañan a esos dibujos para dejar constancia más fiable de las piezas o zonas descubiertas (Dorrell, 1994).

Con la aparición de la fotografía digital, Kodak sacó al mercado esta tecnología en 1991 (Lucas & Goh, 2009), así con el auge que aparece en los años 90 del siglo pasado en relación con programas informáticos y software vinculados al procesado de fotografías digitales, las técnicas utilizadas en el registro y documentación de excavaciones se ven favorecidas al incorporar una mayor precisión en piezas, cortes y demás hallazgos (Shanks & Svabo, 2013). Este nuevo proceso de cambio en los procesos de trabajo en una excavación surge en los Estados Unidos, reconocido como "Arqueología Procesual" (Renfrew & Bahn, 2007), los arqueólogos estadounidenses advertían que el obtener información precisa de cualquier resto del pasado nos hace encontrar explicaciones a comportamientos de las civilizaciones antiguas y no solo a describir lo descubierto (Renfrew & Bahn, 2008).

La necesidad de una metodología precisa en el registro arqueológico ha llevado a diferentes organismos, entre ellos las universidades, a plantear una homogenización de métodos y técnicas (Mora Torcal et al., 2014). Pero no consiguiéndose esta homogenización en la metodología a seguir existe una gran diversidad en cuanto a parámetros y técnicas a seguir y es el propio arqueólogo en campo quien determina su forma de trabajar.

La ubicación de cualquier hallazgo ha sido importante, ya que con este dato se pueden realizar averiguaciones de cómo se comporta, por ejemplo, la ordenación de una población o las distintas construcciones dentro de una ciudad. En la actualidad aún se hace uso de niveles ópticos en las excavaciones, que ayudados por una cuadrícula posicionada en un plano horizontal y de dimensiones del m² cada una, nos facilitan la cota que manejamos en cada corte de una excavación (Barceló et al., 2003). Con ello se consiguen implementar un sistema de coordenadas cartesianas y darle a recinto una posición y dimensión real. Con esta técnica se realizan registros de piezas y lugares encontrado, pero todo apoyado en ese plano horizontal. Con la aparición de las estaciones totales y posteriormente también de los sistemas GNSS, el uso de estos equipos en arqueología hace más factible la implementación de un sistema de coordenadas en la zona de trabajo (Chapman & Van de Noort, 2001) y con ello con el objetivo de dotar al lugar de su ubicación exacta sobre un sistema de referencia global, esto es georreferenciación. Además, todo esto de forma indudable con mayor precisión.

Por todo ello el objetivo general de este capítulo es el empleo de técnicas geomáticas en los cortes arqueológicos, y como objetivos específicos:

- implementar un sistema de coordenadas con métodos GNSS previos
- la utilización de estación total para realizar crear puntos de control de apoyo a la fotogrametría
- realización de levantamiento fotogramétrico desde tierra
- creación de la ortografía de los cortes arqueológicos
- creación de modelo tridimensionales como herramientas de trabajo en arqueología
- analizar la precisión y fiabilidad de los datos obtenidos haciendo uso de ellos para la integración en un SIG.

3.2. Situación de los cortes arqueológicos estudiados

Los cortes estudiados pertenecen a la excavación arqueológica del yacimiento de Útica descrito en el capítulo anterior. Se sitúa en las coordenadas geográficas $37^{\circ}0.3'47.02''N$ $10^{\circ}0.3'47.02''E$ y en coordenadas 594507.98, 4102001.64N, UTM (EPSG 32632), a 37 km de la capital, Túnez.

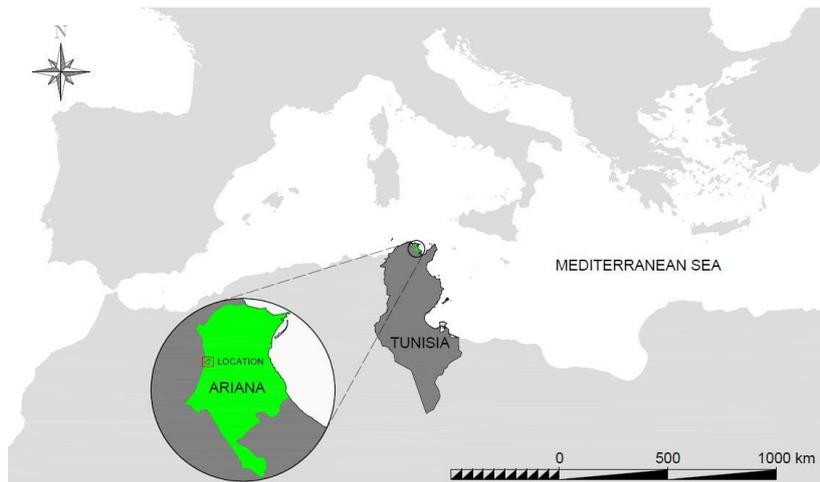


Figura 3.1. Ubicación Yacimiento Útica

El estudio en esta excavación surgió en el año 2010, con un acuerdo con el INP (Instituto Nacional de Patrimonio) de Túnez, con una misión internacional compuesta por tres países, Reino Unido, Francia y España, a través de las universidades de Oxford, la Sorbona y Almería. El reparto de los sectores de la excavación fue el de la figura 3.2 (Monchambert et al., 2012).



Figura 3.2. Sectores de estudio en el año 2010 en el Yacimiento Útica

La misión española comenzó con la prospección geofísica, que ayuda a determinar las excavaciones posteriores y la aparición de los cortes que se llevarán a estudio (Teixidó & Peña, 2019), véase ejemplo en la figura 3.3. Desde ese año, 2010, se realizaron diferentes campañas en la cuales aparecieron una serie de cortes que fueron determinando el comportamiento y la distribución que la cultura fenicia tenía en la antigüedad (Teixidó et al., 2012).

No es hasta la campaña 2018 cuando se ejecuta la técnica fotogramétrica y geodésicas en parte de la excavación, concretamente se pudo trabajar en los cortes 20, 10 (zona 1 y 2), corte 15 y parte del corte 12. En la campaña 2019 se realizó fotogramétricamente el corte 11 al completo.

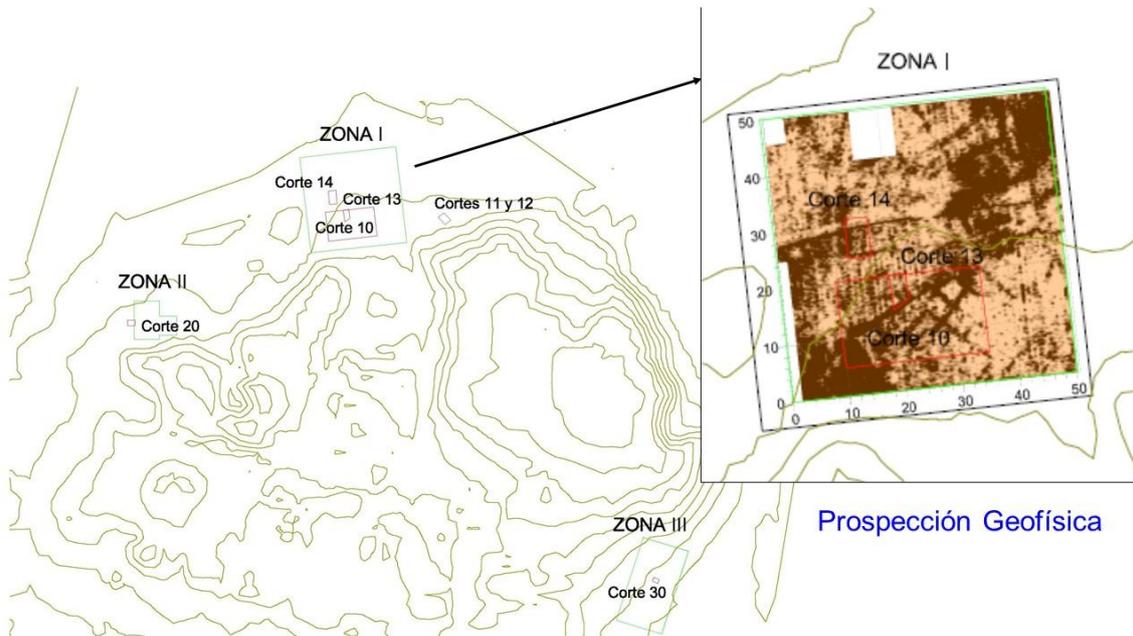


Figura 3.3. Ubicación de los cortes y ejemplos de prospección geofísica

3.3. Metodología

3.3.1 Establecimiento de puntos de control de cada corte

La precisión GPS relativo o GPS en RTK es de precisión centimétrica (Li et al., 2015), sin embargo, las técnicas de fotogrametría basadas en SfM que se emplearan más adelante pueden generar resultados con precisiones milimétricas (Mali & Kuiry, 2018). Por ello la precisión final o precisión máxima dependerá de la precisión que tengan los puntos de control (Sanz-Ablanedo et al., 2018). De modo que los puntos medidos con GNSS podrían limitar la precisión máxima alcanzable. Por ello, como solución se optó por emplear una estación total TCR703 de la marca Leica, con precisión angular de 10 segundos centesimales, y en longitud de $2\text{mm} + 2\text{ ppm.}$, con ella se obtienen precisiones en los puntos de control superiores a las máximas posibles con SfM, a la escala de detalle con la que se trabajará. En la figura 3.4 se muestra un ejemplo de medición de puntos de control con la Estación total TCR703 en el corte 20.

Se estableció un sistema de coordenadas local para cada corte del yacimiento, ya que el determinado por el sistema GNSS tiene una precisión relativa peor que la que se puede obtener con la estación total.



Figura 3.4. Medición con la Estación total TCR703. Corte 20

En el sistema de coordenadas local de cada corte se midieron los puntos de control levantados con GNSS visibles desde la posición de la estación y puntos de control necesarios para el ajuste de los modelos generados por SfM. Los puntos levantados con GNSS, estaban señalizados con gavillas o tochos de metal fijados en la zona con bastante rigidez y robustez. Los puntos medidos con la estación total, que servirán como puntos de control para generar modelos 3D con técnicas fotogramétricas se marcaron con dianas, véase figura 3.5.



Figura 3.5. Dianas para señalar puntos de control

En la tabla 3.1 se muestran las coordenadas de los puntos medidos con la estación total en el corte 20.

Tabla 3.1. Coordenadas relativas en metros. Corte 20

Puntos Corte 20	X	Y	Z
1	101.963	100.400	8.265
2	101.859	106.975	8.527
3	105.715	107.990	7.791
4	107.891	108.089	8.766
5	109.946	103.753	8.151
6	117.669	105.358	8.528
7	118.715	101.034	8.019
8	107.015	96.410	8.044
9	104.078	101.354	6.285
10	107.865	100.788	6.479
11	109.051	103.787	5.630
12	105.809	104.450	7.445
13	103.672	104.637	7.582

3.3.2 Georreferenciación de los puntos de control de cada corte

Para descartar errores compuestos del propio error relativo del sistema de medición GNSS (errores centimétricos) y de la deformación propia de la proyección UTM (coeficiente de anamorfosis lineal) se hace necesario eliminar la proyección UTM del levantamiento GNSS para trabajar exclusivamente con errores propios de la precisión del sistema empleado.

Una vez eliminada la proyección, ya trabajando en coordenadas relativas se procedió a desplazar y girar los puntos de control medidos en cada corte, ajustándolos con los medidos mediante GNSS. Se hizo un estudio estadístico del desplazamiento planimétrico de cada punto para realizar el mejor ajuste posible, asumiendo siempre que la mejor precisión relativa es la que se obtiene con la estación total. Posteriormente se hizo otro ajuste respecto a las cotas, promediando las diferencias entre las cotas ortométricas GNSS y las cotas relativas de la estación total. Se hizo un estudio estadístico de dichas diferencias y se calculó el valor más probable para realizar el ajuste.

Una vez establecido el ajuste de todos los sistemas de coordenadas locales utilizados en los distintos cortes para su integración en el sistema de coordenadas relativo generado para la medición GNSS, se restituyó la proyección UTM, para tener la totalidad de los puntos levantados en el sistema de referencia establecido anteriormente con los GNSS. En la tabla 3.2 se observan los puntos del corte 20 una vez restituida proyección y establecido el sistema de referencia inicial.

Tabla 3.2. Coordenadas UTM. Corte 20

Puntos Corte 20	X _{UTM}	Y _{UTM}	Z _H
1	594367.189	4101945.410	4.595
2	594367.159	4101938.837	4.857
3	594363.286	4101937.901	4.121
4	594361.108	4101937.845	5.096
5	594359.141	4101942.221	4.481
6	594351.389	4101940.774	4.858
7	594350.432	4101945.117	4.349
8	594362.220	4101949.501	4.374
9	594365.056	4101944.500	2.615
10	594361.281	4101945.143	2.809
11	594360.036	4101942.169	1.960
12	594363.262	4101941.440	3.775
13	594365.394	4101941.210	3.912

3.3.3. Metodología para la Toma de Fotografías

Una vez establecido el sistema de coordenadas y medidos todos los puntos de control de cada corte se procede a la toma de fotografías, corte a corte. Las fotografías deben de cumplir una

serie de requisitos mínimos para que el resultado y la previa utilización de la técnica SfM sea óptimo. El solape es una parte importante a la hora de tomar las fotos, se debe cumplir un solape entre el 60 y 80%, pero a su vez, a mayor porcentaje en el solape mayor cantidad de fotografías necesarias. La luz es un factor importante para tener en cuenta, no debe incidir directamente sobre los cortes ya que se producen contrastes y sombras que se deben evitar. Por ejemplo, en el corte 10, en la campaña 2018, se tuvo que repetir la toma de fotos ya que, al procesar, las sombras hicieron inservibles los resultados. Por ello, las fotografías se tomaron al atardecer cuando la posición del sol ayuda a corregir esa luminosidad excesiva. La cámara empleada fue una CANNON Powershot G3X, distancia focal 8.8mm y tamaño píxel 2.4x2.4 micras.

La mayoría de los cortes de este yacimiento tienen elementos a distintas alturas, que suponen planos a distintas alturas. La técnica aplicada, y que fue exitosa, fue tomar las fotografías del siguiente modo:

- Primero se realizaba una pasada alrededor del corte, es decir a ras del suelo, y dependiendo del tamaño del corte se toma en cada posición y con ángulos diferentes tantas fotos como fuesen necesaria para abarcar desde el lado opuesto hasta nuestra posición, véase figura 3.6.
- Segundo, se baja al corte, todos ellos están por debajo de la cota actual del terreno, se realizan fotos con desplazamiento en forma de espiral, de esta manera se van obteniendo imágenes de aquellos elementos salientes y entrantes del corte. Se aplica en cada desplazamiento tres o cuatro posiciones en altura, según sea necesario, véase figura 3.6.
- Por último y no siempre necesario, pero da buen resultado, se realiza una pasada en sentido nadiral imitando el vuelo de un dron.

A modo de ejemplo, en el corte 20 se tomaron 475 fotografías. La ubicación de cada una de las cámaras, en todo el corte, se puede observar en la figura 3.7.



Figura 3.4. Toma de fotografías. Corte 20

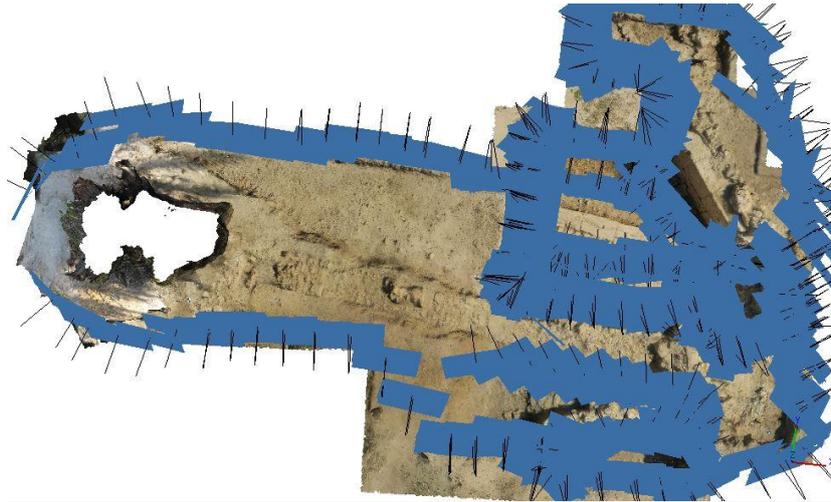


Figura 3.5. Disposición de cámaras. Corte 20

El solapamiento obtenido en el corte 20 fue magnifico ya que se obtuvo el máximo como se aprecia en la figura 3.8.

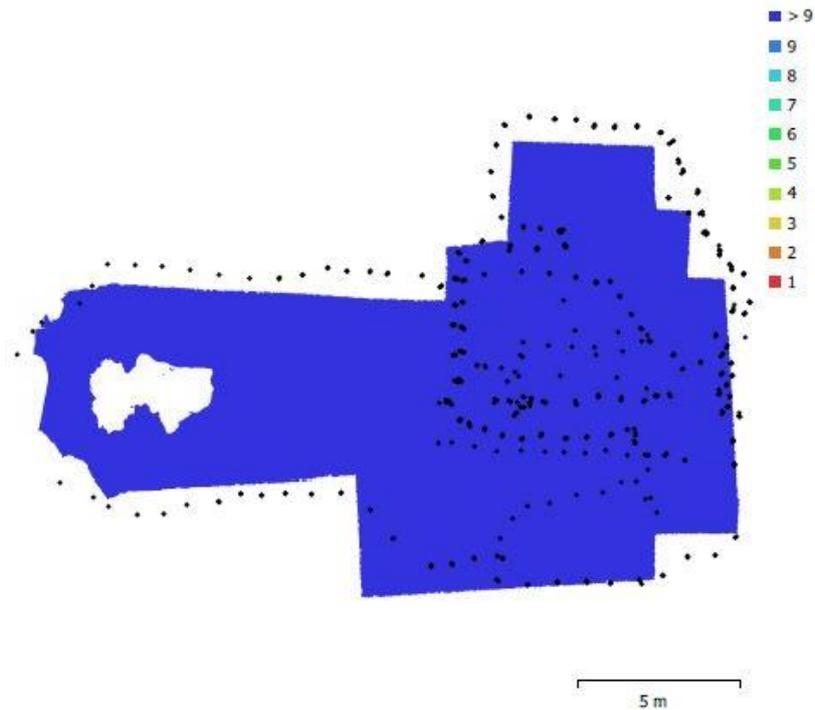


Figura 3.6. Solape. Corte 20

3.3.4. Procesado de Información

Una vez obtenidas las fotografías de los cortes se procesaron con el software Agisoft Photoscan, actualmente Agisoft Metashape, cuyos algoritmos de cálculo se basan en las técnicas de SfM. Dicho programa realiza una serie de procesos, todos automáticos y simplemente eligiendo mayor o menor precisión en cada uno de ellos, dependiendo del resultado buscado y del

material que se haya obtenido con la toma de fotografías, se irán seleccionando los parámetros necesarios.

Como ya se explicó en el capítulo anterior el orientar las fotografías es uno de los procesos más importantes, en él se refleja el buen solapamiento que se ha realizado al tomar las fotos, utiliza un algoritmo similar al SIFT (Scale Invariant Feature Transforms; Lowe, 1999), emparejamiento de puntos entre fotografías, y generación de puntos de paso 3D (Wu, 2013) Se pone de manifiesto el ajuste bundler y con ello una primera nube de puntos dispersas que sin estar aún orientada ni georreferenciada llega a tomar forma del objeto o zona a representar.



Figura 3.7. Nube de puntos dispersa. Corte 20

Por ejemplo, con la nube de puntos dispersa, figura 3.9, obtenida en el Corte 20 se obtuvieron 392.744 puntos. En este momento se hace uso de los puntos de control (GCP) para posicionar las coordenadas tomadas en la zona y con ella, ajustar esa nube de puntos antes de generar la nube de puntos densa.

En el corte 20 se posicionaron 13 puntos de control como se ha mencionado, el proceso para ubicar estos puntos con el programa Metashape, es el único proceso en el que se emplea tiempo de ejecución por parte del operario. Se colocaron tres puntos marcadores en el conjunto de fotos. En este corte en concreto de las 475 fotos que se disponían, se orientaron 472, una vez ubicados estos tres puntos. La recomendación es que se sitúen lo más alejados entre sí que se pueda. Posteriormente se importa el fichero ASCII con el resto de los puntos, figura 3.10.

Se irán validando cada uno de los marcadores en cada una de las fotos que aparezcan, es un proceso costoso y minucioso por lo que se invierte mucho tiempo. Con este trabajo de investigación se han llegado a realizar varias pruebas para acortar este tiempo. Una de ella es realizar una selección de fotos, es decir, elegir una entre cuatro y así se validan marcadores en menos fotos.

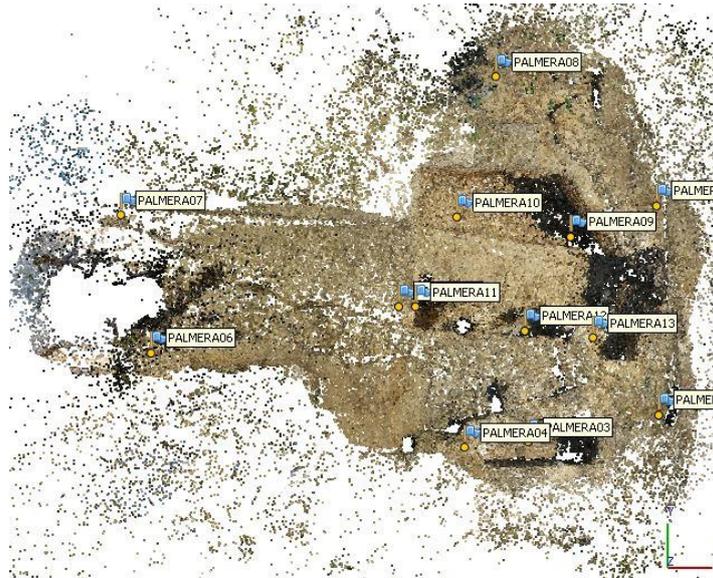


Figura 3.8. Puntos GCP. Corte 20

El siguiente paso es optimizar esa nube de puntos dispersa junto con las coordenadas implementadas en el conjunto. Con ello se consigue ajustar la rotación, orientación y escalar los modelos que se generan. Con esta optimización se consigue disminuir el error de la orientación. Terminado todo el proceso es necesario comprobar los errores obtenidos durante el mismo para estimar la necesidad, o no, de repetir la toma de datos, figura 3.11.

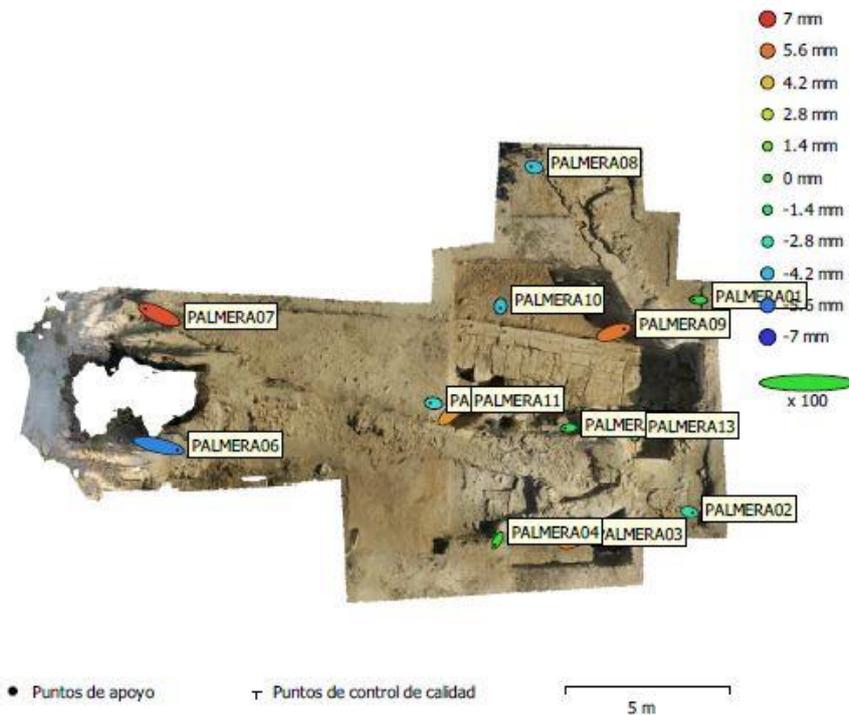


Figura 3.9. Validación Puntos de control. Corte 20 (La elipse verde de error está en mm)

Se puede observar en la tabla 3.3 que los errores cometidos, ya expresados en mm, ya que se midieron con la estación total, están por debajo de los 5 mm en cada una de las coordenadas y en cuanto a el error en píxel que proporciona la imagen es bastante bueno.

Tabla 3.3: Errores de puntos de apoyo o marcadores. Corte20

Punto	Error en X (mm)	Error en Y (mm)	Error en Z (mm)	Total (mm)	Imagen (pix)
PALMERA07	-8.324	3.660	6.360	11.097	0.906(4)
PALMERA09	6.273	2.115	5.620	8.683	2.941(82)
PALMERA03	-4.885	-2.047	5.402	7.566	1.007(32)
PALMERA01	-3.17147	0.215803	-0.276075	3.191	2.101(57)
PALMERA02	1.888	-0.474	-2.461	3.350	1.642(33)
PALMERA04	-1.683	-2.895	0.0640	3.350	1.169(42)
PALMERA05	-1.933	0.260	-3.175	3.726	1.316(44)
PALMERA06	11.437	-2.641	-5.309	12.882	1.715(8)
PALMERA08	-1.723	0.372	-3.984	4.357	1.130(31)
PALMERA10	-0.061	-1.068	-4.077	4.215	1.109(101)
PALMERA11	4.780	4.682	5.009	8.358	1.241(24)
PALMERA12	-2.320	-0.203	-0.755	2.448	0.900(114)
PALMERA13	-0.277	-1.975	-2.422	3.138	1.166(103)
Error Medio Total	4.920	2.234	4.016	6.733	1.576

El siguiente paso fue generar la nube de puntos densa, véase figura3.12, dicho proceso se apoya en múltiples algoritmos basados en *pair-wise depth map computation* (Verhoeve, Doneus, Briese, & Vermeulen, 2012) y *Multi-view*; (Furukawa, & Ponce, 2010; Seitz, Curless, Diebel, Scharstein, & Szeliski, 2006). Con ello se consigue una visión aún más real del corte arqueológico. Nótese que, aunque parezca que ya se tiene un modelo 3D, lo que se visualiza es conjunto de puntos, en concreto 7.966.857 puntos y eso que se realizó en calidad baja, es decir con nivel de filtrado “agresivo”.



Figura 3.10. Nube de puntos densa. Corte 20

3.3.5. Modelo 3D

Para que la nube de puntos densa pase a ser un modelo hay que unir todos ellos en una malla. El software Metashape realiza una malla generando una triangulación para con el conjunto de puntos generar una sola entidad. Al estar en cortes arqueológicos en los cuales hay diferencias de cotas grandes, entrantes, salientes y recovecos que dificultan la representación o unión de la nube, el algoritmo que ejecuta dicha malla realiza dicho proceso determinado por dos elecciones según el tipo de superficie que tengamos, "bajo relieve" o "arbitrario". Para todos los cortes se eligió el arbitrario. Ya que como son superficies que encierran información en distintos planos. Por el contrario, si solo se quisiera representar una superficie con la proyección de un único plano, sería suficiente para representar la totalidad del conjunto, se elegiría, "bajo relieve".

Una vez generada la malla, figura 3.13, que en este corte obtuvo 988.374 caras con 497.047 vértices, ya si se puede hablar de un modelo 3D, ya que se tiene una sola entidad. Con este formato de modelo ya se puede generar un modelo digital de elevaciones y la Ortofotografía. Además, para que la visión del corte sea lo más fiel a la realidad posible, se le aplica la textura, que consiste en transferir los colores de los píxeles de las fotografías o de una fotografía en concreto, figura 3.14.

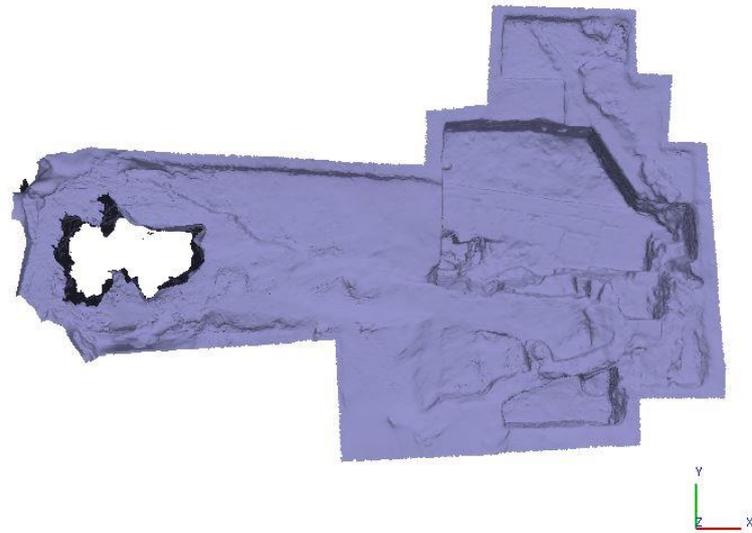


Figura 3.11. Malla sombreada. Corte 20

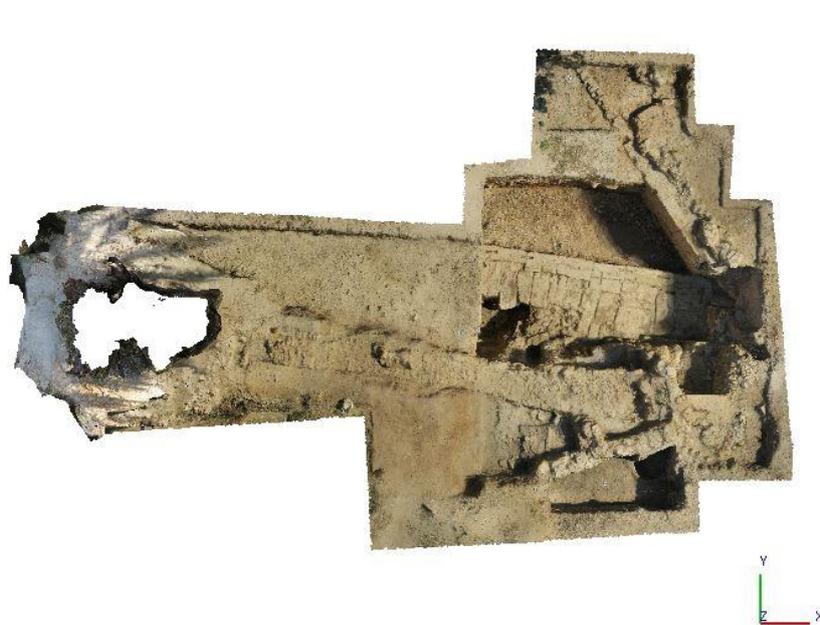


Figura 3.12. Modelo con textura. Corte 20

3.4. Resultados de Ortofotografía y Modelo Digital de Elevaciones del corte 20

La exportación de toda la información generada es muy variada tanto en formato como en tipo de archivo. Es decir, podemos exportar tanto nubes de puntos, dispersa o densa, modelo, ortomosaico, modelo digital de elevaciones...y en de diferentes formatos, .pdf, .dxf, .obj, tiff, ...

Para el trabajo que se está desarrollando, el ver las aplicaciones de estas técnicas a la arqueología, es bastante útil contar con la ortofoto de cada corte, así como el modelo digital de elevaciones (MDE), que nos permite generar las curvas de nivel y con ello tener una representación de la altimetría de la zona.

Un modelo digital de elevaciones del lugar permite comprobar el comportamiento de las cotas en el terreno. Se genera con una proyección ortogonal desde el plano de proyección de arriba XY a partir de la nube de puntos densa. En el corte 20 se generó con una resolución de 0.0076 m y un tamaño de píxel de 3322x2545 pix, figura 3.15 TIFF QGIS

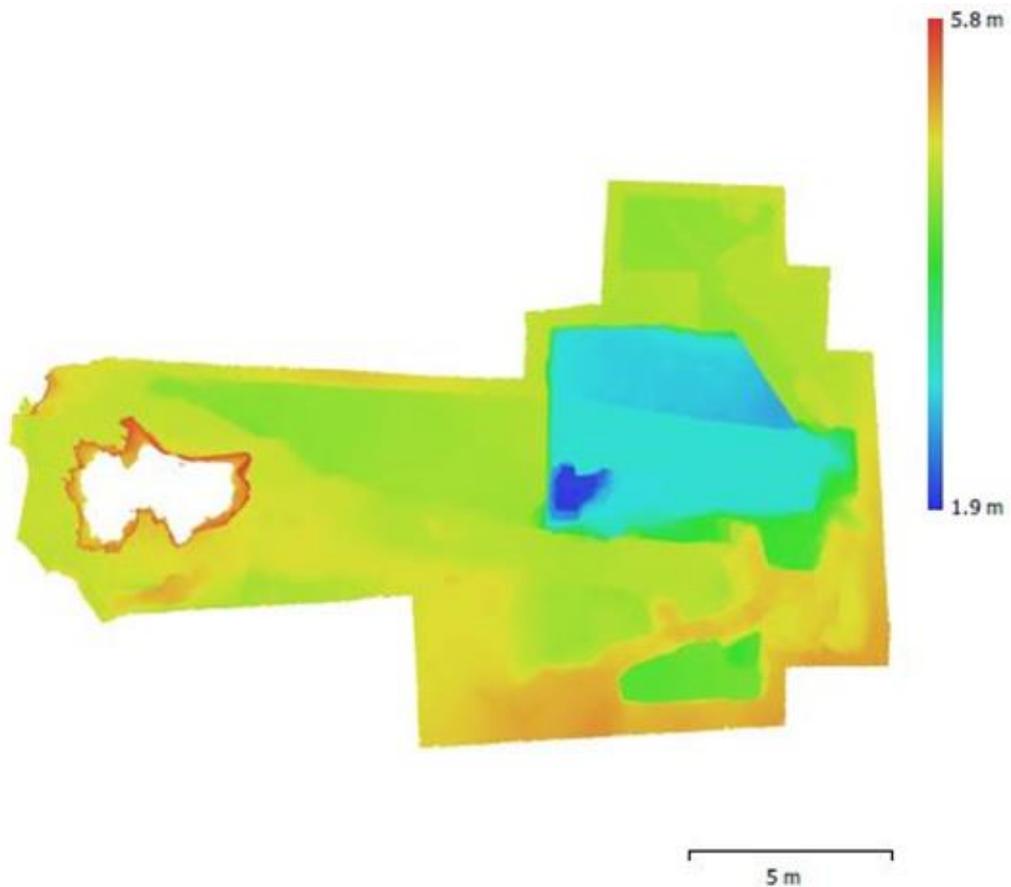


Figura 3.13. MDE. Corte 20

A la hora de exportar se realiza con extensión TIFF y al generarlo se puede obtener las curvas de nivel o bien en Metashape o si lo exportamos a un software SIG, como QGIS, también dará esta opción. En esta tesis se han generado con una equidistancia de 0.5m. Figura 3.16.

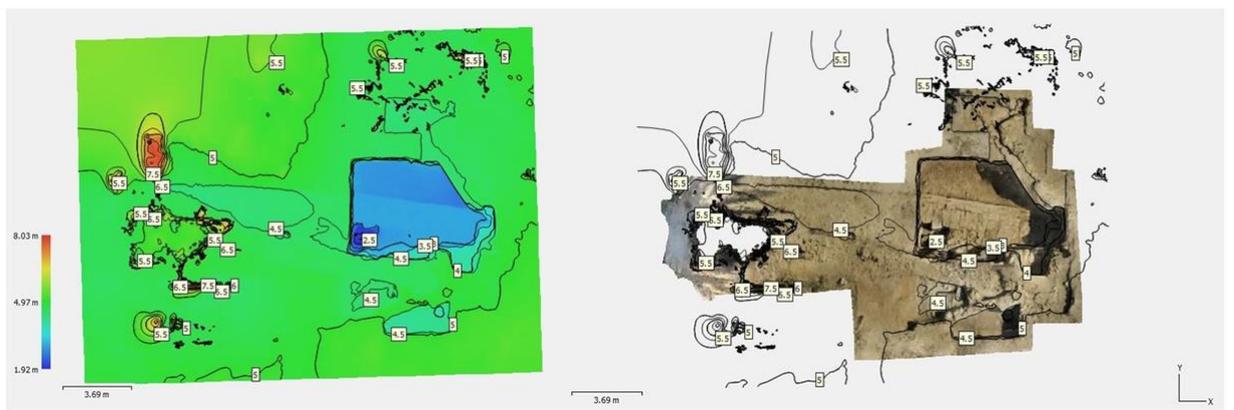


Figura 3.14. Curvas de nivel en MDE y Ortomosaico

Para obtener una ortofoto del corte, primero debemos generar el ortomosaico, el cual se realiza bajo una proyección ortogonal, en coordenadas locales y a través de la malla. En el corte 20 el tamaño del píxel obtenido a la hora de generarlo es de 0.0009 décimas de milímetro tanto en X como en Y. Una vez generado, solo queda exportarlo, figura 3.



Figura 3.15. Ortomosaico. Corte 20

Como uso se puede importar tanto la ortofoto como el MDE a un Sistema de Información Geográfica (SIG), en la investigación se ha utilizado QGIS, software libre y con bastantes prestaciones. Se introduce tanto la ortofoto, como el MDE, y se pueden realizar consultas para comprobar que la precisión con la que se ha ejecutado el trabajo es alta. Se consultarán puntos de control en la ortofoto y con herramientas del propio software y gracias a combinar la

información con el MDE se podrá comparar las coordenadas de puntos medidos con la estación total y los que se consulten directamente en QGIS. En la figura 3.18 se puede apreciar bajo la ortofoto el MDE que proporciona toda la información al modelo de la altitud o desnivel en el corte y en él se han consultado un total de ocho puntos de control.



Figura 3.16. Ortofoto y MDE representado en QGIS. Corte 20

Una vez realizada las operaciones oportunas, creando las capas de información o shapes correspondientes, en QGIS se obtienen las coordenadas. En la tabla 3.4 se puede observar las diferencias con las medidas con estación total.

Tabla 3.4: Comparativa de Coordenadas UTM entre Estación Total y QGIS. Corte 20

Puntos	X_{UTM} TCR705	X_{UTM} QGIS	Y_{UTM} TCR705	Y_{UTM} QGIS	Z_H TCR705	Z_H QGIS
1	594367.189	594367.195	4101945.410	4101945.416	4.595	4.609
2	594367.159	594367.161	4101938.837	4101938.835	4.857	4.856
4	594361.108	594361.107	4101937.845	4101937.844	5.096	5.092
5	594359.141	594359.139	4101942.221	4101942.221	4.481	4.481
10	594361.281	594361.280	4101945.143	4101945.141	2.809	2.806
11	594360.036	594360.042	4101942.169	4101942.173	1.960	1.965
12	594363.262	594363.261	4101941.440	4101941.438	3.775	3.777

13	594365.394	594365.393	4101941.210	4101941.207	3.912	3.913
Error promedio	0.003		0.003		0.004	

3.5. Resultados del Corte10

En todos los cortes se analizarán los siguientes valores:

- Toma de fotografías
- Solape conseguido
- Nube dispersa
- Errores cometidos con los puntos de control
- Nube de puntos densa
- Malla
- Textura-Modelo 3D
- MDE
- Curvas de Nivel
- Ortomosaico

El corte 10 al ser un corte extenso se realizó en tres partes en cuanto a la toma de fotografías, el proceso con metashape se realizó dividiendo el corte en dos sectores, 1 y 2. Todo ello se realizó en la campaña 2018.

Sector 1

- Toma de fotografías: Se tomaron 372 fotografías y se orientaron con presión alta, quedando todas ellas orientadas. En la figura 3.19 se aprecian la colocación de las cámaras al tomar las fotos.

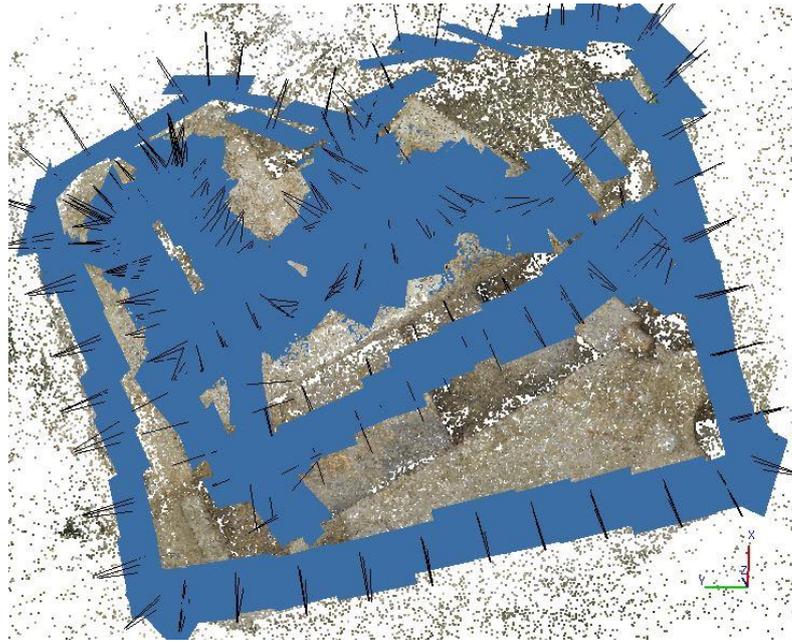


Figura 3.17. Disposición de cámaras

- Solape: Como se aprecia en la figura 3.20 se realiza una buena toma de fotografías ya que el solapamiento llega al máximo.

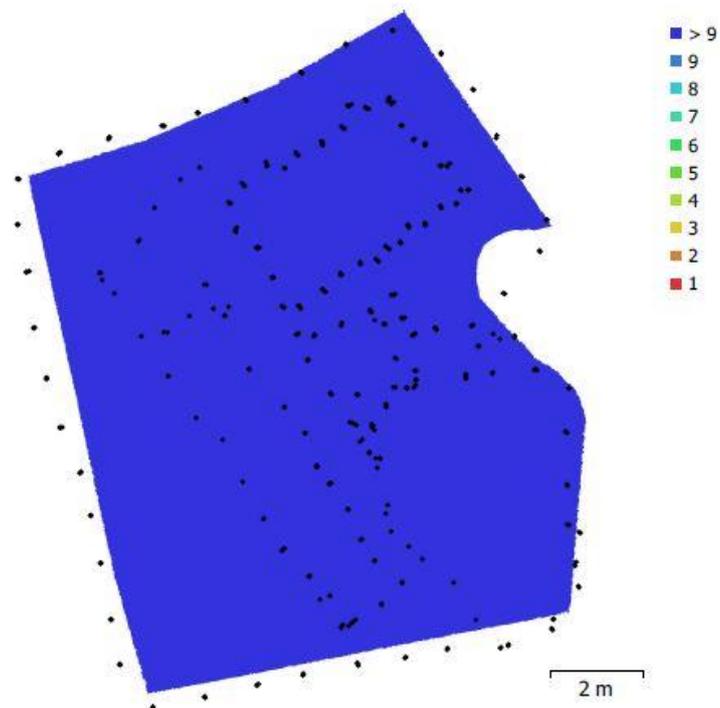


Figura 3.18. Solape. Corte 10-sector 1

- Nube dispersa: La nube dispersa se genera con 370.402 puntos a precisión alta. Figura 3.21.



Figura 3.19. Nube dispersa. Corte 10-sector 1

- Colocación de puntos de control y errores cometidos. En este corte se colocaron 7 marcadores, llegando a cometer errores milimétricos una vez estuvieron todos validados. Figura 3.22.

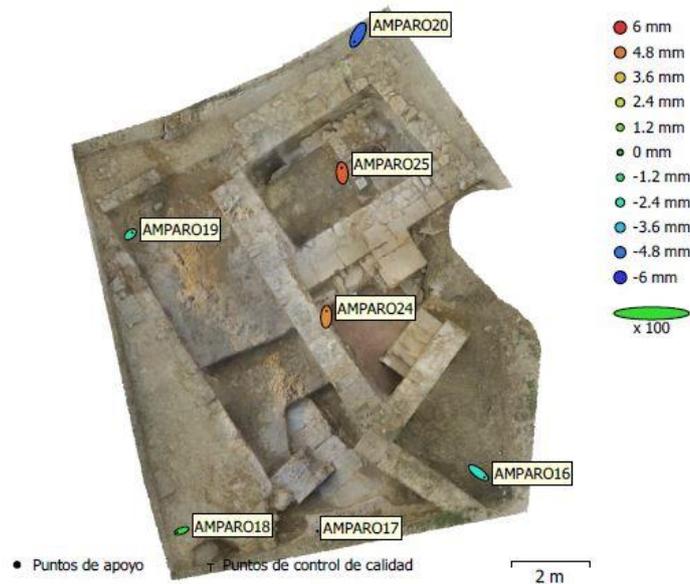


Figura 3.20. Posiciones de GCP y estimación de errores

Como ya hemos explicado una vez validados todos los marcadores se realiza la optimización que ayuda a disminuir el error de la orientación.

Tabla 3.5. Errores de GCP. Corte 10-sector 1

Nombre	Error X (mm)	Error Y (mm)	Error Z (mm)	Total (mm)	Imagen (pix)
AMPARO25	-0.219	2.688	5.210	5.867	1.338(73)
AMPARO18	-2.153297	-0.769	0.081	2.288	1.857(49)
AMPARO19	1.02903	0.881	-2.093	2.491	4.660(67)
AMPARO16	3.022	-2.272	-2.542	4.556	1.031(5)
AMPARO17					
AMPARO20	-1.826	-3.513	-5.081	6.442	3.253(10)
AMPARO24	0.144	2.984	4.421	5.335	1.562(32)
Error Medio Total	1.743	2.415	3.727	4.771	2.870

Se aprecia que faltan los valores del punto "Amparo17", es debido que la diana que se colocó en el corte desapareció.

- Nube de punto densa: Se procesó a calidad media y nivel de filtrado agresivo, con ello se generó 29.596.807 puntos. Figura 3.23.



Figura 3.21. Nube de puntos densa. Corte 10-sector 1

- Malla: Se realiza a calidad media con nivel de filtrado agresivo y como parámetro de reconstrucción se elige el formato arbitrario en tipo de superficie, con ello se generan 1.497.914 caras con 750.248 vértices, figura 3.24.



Figura 3.22. Malla sombreada. Corte 10-sector 1

- Textura: Con la textura incorporamos los colores de los píxeles. Se realiza con modo de mapeado genérico y modo de mezcla mosaico. Figura 3.25 y 3.26.



Figura 3.23. Modelo con textura. Corte 10-sector 1



Figura 3.24. Vistas del modelo con textura. Corte 10-sector 1

- Modelo Digital de Elevaciones (MDE): Se realiza con proyección planar, plano de proyección de arriba XY. Se toman los datos para procesar el modelo de la nube de puntos densa, la interpolación está habilitada y la resolución con la que se realizará el modelo es de 0.003 mm, con un tamaño total (pix) 4932 x 5677. Figura 3.27.

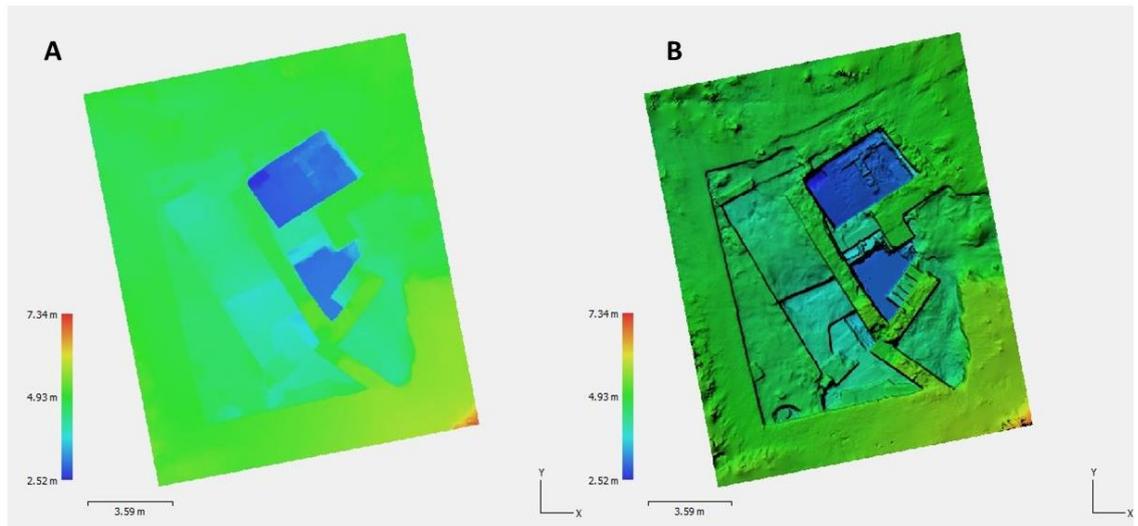


Figura 3.25. A) MDE. B) MDE con sombreado de Relieve. Corte 10-sector 1

- Curvas de Nivel: Al generar en el corte 10, sector 1, las curvas de nivel el software nos informa que la altitud mínima en metros detectada es de 2.52416 y la altitud máxima 7.34417 m. Se ejecutan a equidistancia de 0.5m. Figura 3.28.

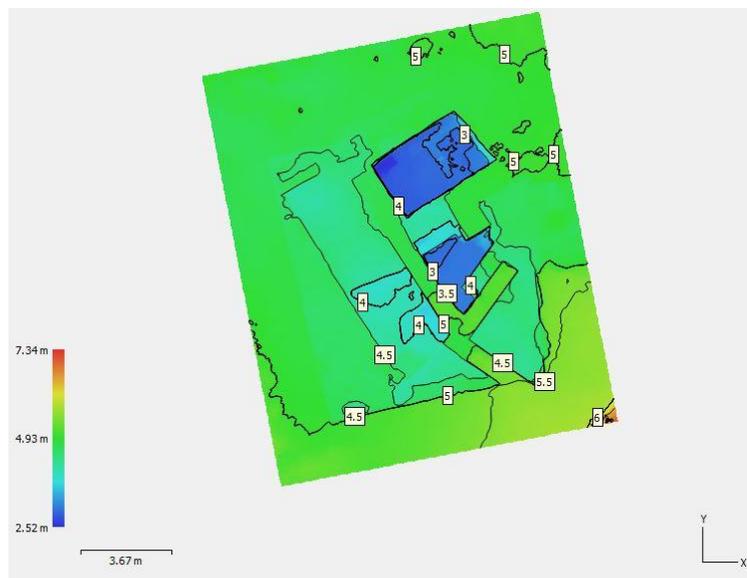


Figura 3.26. Curvas de nivel a 0.5m en MDE

- Ortomosaico: Al generar el ortomosaico se puede exportar con extensión TIFF y realizar medidas sobre ella. Figura 3.29.



Figura 3.27. Ortomosaico. Corte 10-sector 1

Este resultado en formato TIFF se puede importar a QGIS, software de sistemas de información geográfica (SIG) y en él realizar consultas de la métrica del corte.

En la figura 3.30 se aprecia que consultando puntos de la ortofoto con QGIS y comparándolos con los medidos con la estación total, la diferencia es mínima.



Coordenadas Medidas con Estación Total

Puntos	Coord. X	Coord. Y
16	594473.413	4101976.769
18	594465.606	4101975.353
19	594464.461	4101983.037
24	594469.402	4101981.026
25	594469.788	4101984.700

Coordenadas extraídas por Qgis

Puntos	Coord. X	Coord. Y
16	594473.415	4101976.766
18	594465.599	4101975.349
19	594464.461	4101983.034
24	594469.402	4101981.028
25	594469.788	4101984.703

Figura 3.28. Comparativa métrica en QGIS

Con esta comprobación podemos afirmar que cualquier consulta que hagamos con un SIG, utilizando una Ortofotografía con la precisión que hemos generado en este corte, las medidas son como si estuviesen hechas in situ en el lugar de la excavación. Ejemplo la medición realizada en la figura 3.31.

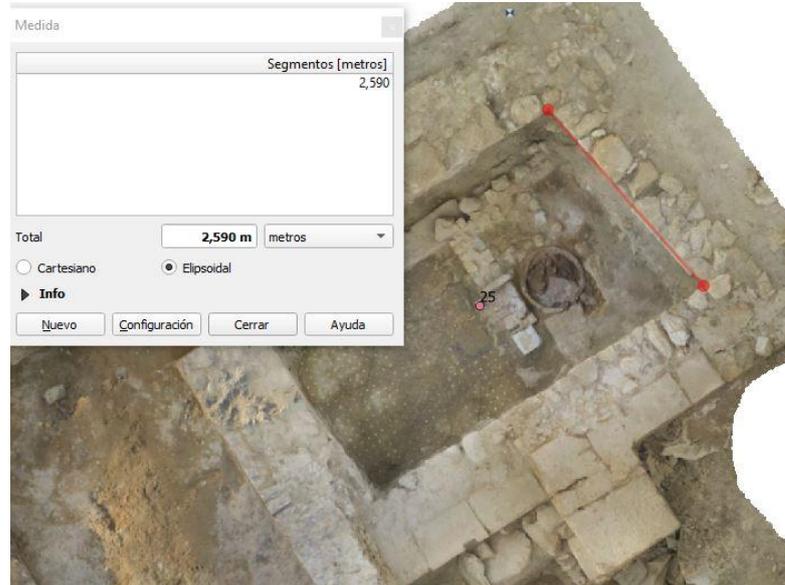


Figura 3.29. Medición de un lateral del corte 10-sector 1

Sector 2

- Toma de fotografías: Se tomaron 476 fotografías y se orientaron con precisión media, quedando todas ellas orientadas. En la figura 3.32 se ve la posición de cada una de las cámaras.

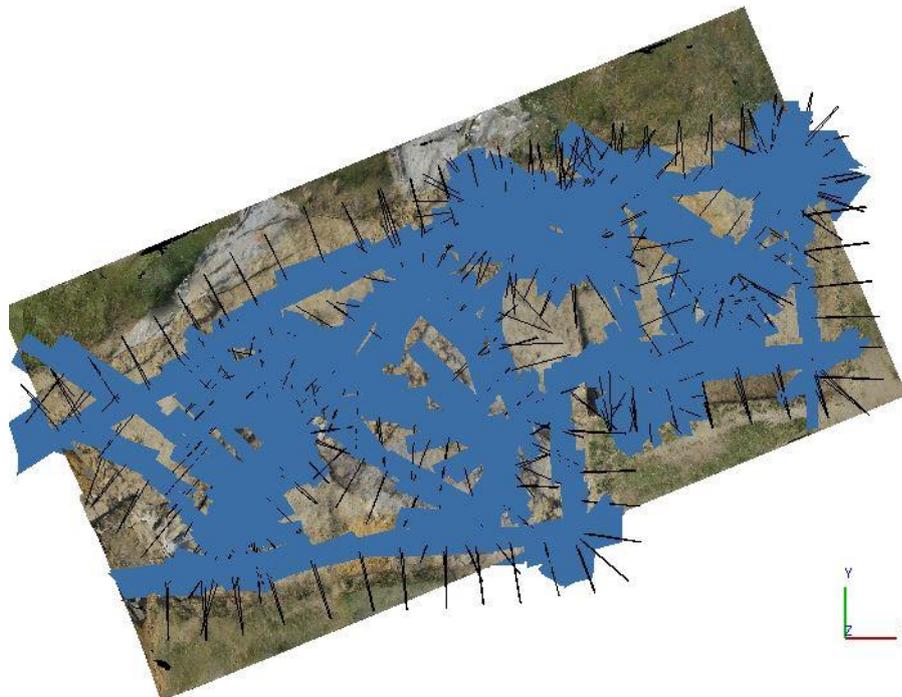


Figura 3.30. Disposición de las cámaras. Corte 10-sector 2

- Solape: Como se aprecia en la figura 3.33 ser realiza un buen solapamiento.

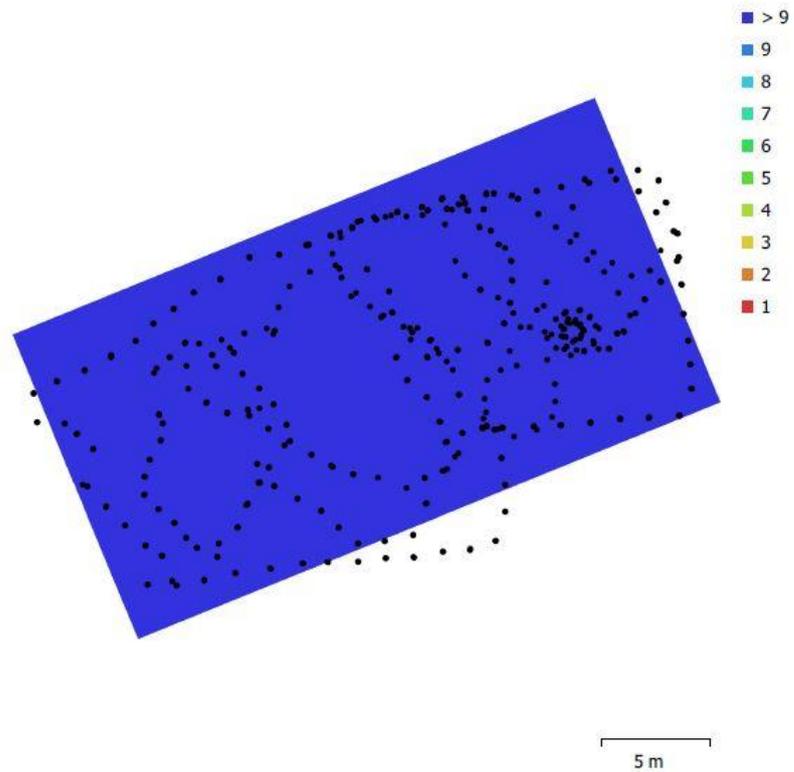


Figura 3.31. Solape. Corte 10-sector 2

- Nube dispersa: La nube de puntos dispersa se genera a una precisión media y genera 671.072 puntos. Figura 3.34.



Figura 3.32. Nube de puntos dispersa. Corte 10-sector 2

- Colocación de puntos de control y errores cometidos. En este corte se ubicaron 15 marcadores o GCP, pero solo se validaron 7, ya que el resto estaba en sectores colindante al sector 2. Figura 3.35.

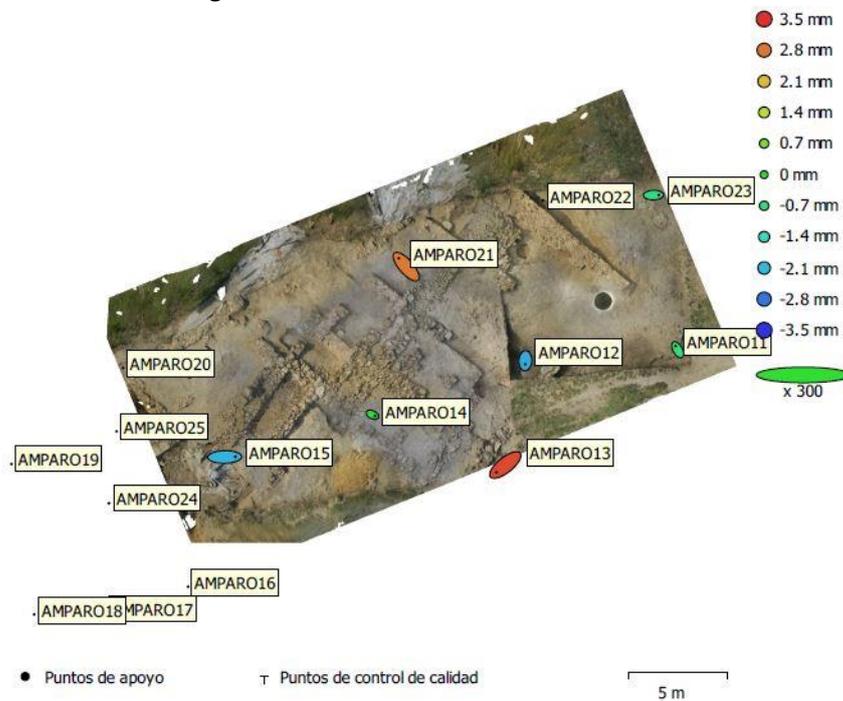


Figura 3.33. Posiciones de marcadores y estimaciones de errores

A continuación, se realiza la optimización para disminuir el error de la orientación y con ello se obtienen los errores cometidos en x, y, z, así como el cometido en imagen.

Tabla 3.6. Errores de GCP. Corte 10-sector 2

Nombre	Error X (mm)	Error Y (mm)	Error Z (mm)	Total (mm)	Imagen (pix)
AMPARO23	1.781	0.039	-0.832	1.966	0.003(9)
AMPARO21	-2.455	2.827	2.770	4.657	0.003(80)
AMPARO12	-0.059	-1.249	-2.265	2.587	2.049(50)
AMPARO11	-0.712	1.263	-0.692	1.607	3.002(13)
AMPARO13	-3.034	-2.459	3.270	5.093	1.449(9)
AMPARO14	0.818	-0.407	-0.0980	0.919	3.788(39)
AMPARO15	3.589	0.070	-2.179	4.199	1.727(36)
Error medio Total	2.153	1.575	2.050	3.365	2.072

- Nube de puntos densa: Se proceso a calidad media con nivel de filtrado moderado, se obtienen 43.997.850 puntos. Figura 3.36.



Figura 3.34. Nube de puntos densa. Corte 10-sector 2

- Malla: Se realizó a calidad media y hay que destacar de este procesado que se eligió en los parámetros de reconstrucción, tipo de superficie, bajo relieve. Esta elección se debe que este corte presenta muy pocos cambios de nivel y el resultado ha sido bueno. Se obtienen 2.708.801 caras y 1.354.668 vértices. Figura 3.37.



Figura 3.35. Malla sombreada. Corte 10-sector 2

- Textura: Al asignarle el color del píxel al modelo generado se consigue la textura. Se realiza con modo de mapeado genérico y modo de mezcla mosaico. Figura 3.38.



Figura 3.36. Modelo con textura. Corte 10-sector 2

- Modelo Digital de Elevaciones (MDE): Se realiza con proyección planar, plano de proyección de arriba XY. Se toman los datos para procesar el modelo de la nube de

puntos densa, la interpolación está habilitada y la resolución con la que se realizará el modelo es de 0.003 mm, con un tamaño total 9540 x 7372 píxel. Figura 3.39.

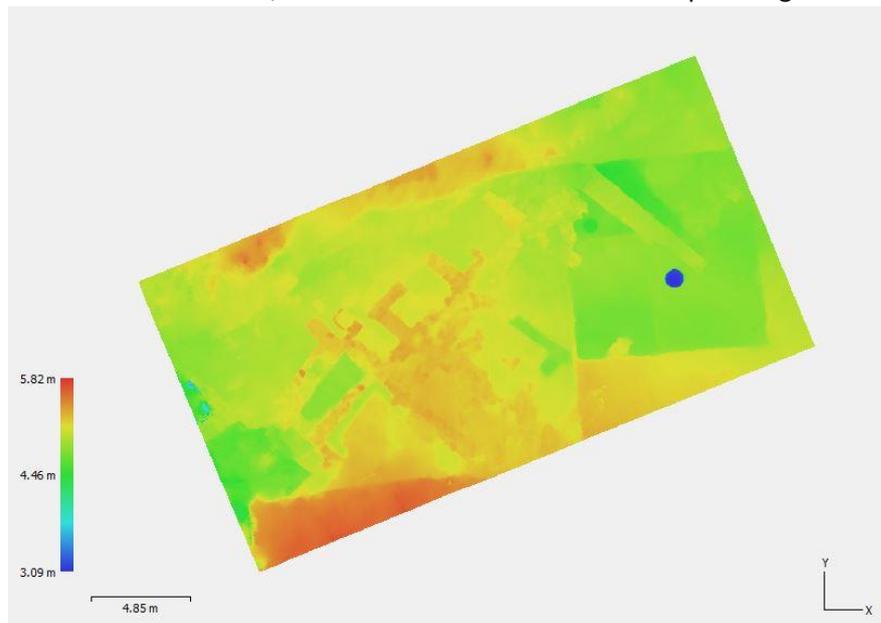


Figura 3.37. MDE. Corte 10-sector 2

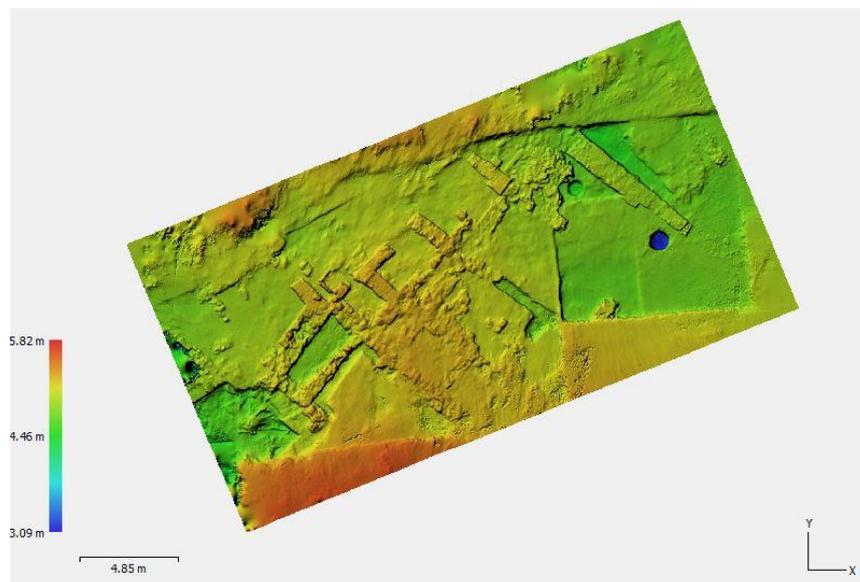


Figura 3.38. MDE con sombreado. Corte 10-sector 2

- Curvas de Nivel: Al generar en el corte 10, sector 2, las curvas de nivel el software nos informa que la altitud mínima en metros detectada es de 3.09243 m y la altitud máxima 5.82366 m. Se ejecutan a equidistancia de 0.5m. Figura 3.41.

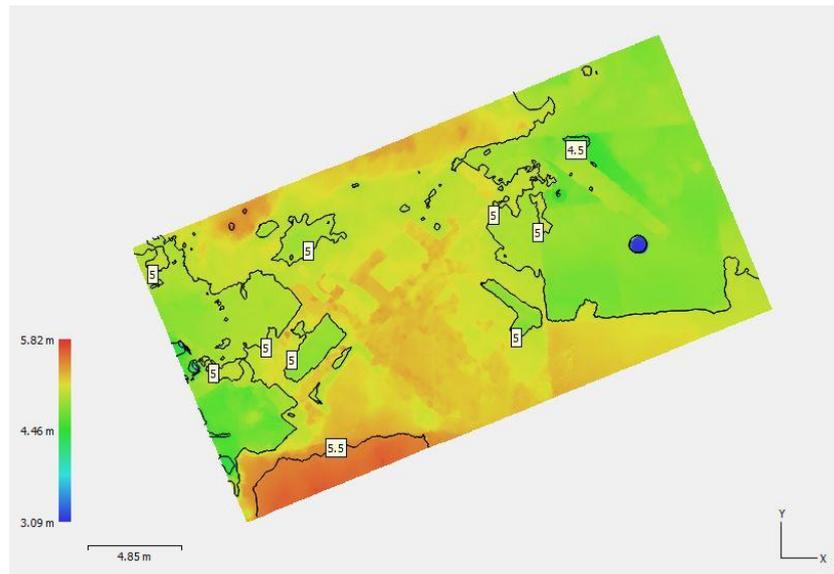


Figura 3.39. Curvas de nivel a 0.5m. Corte 10-sector 2

- Ortomosaico: Al generar el orto mosaico se puede exportar con extensión TIFF y realizar medidas sobre él. Figura 3.42.

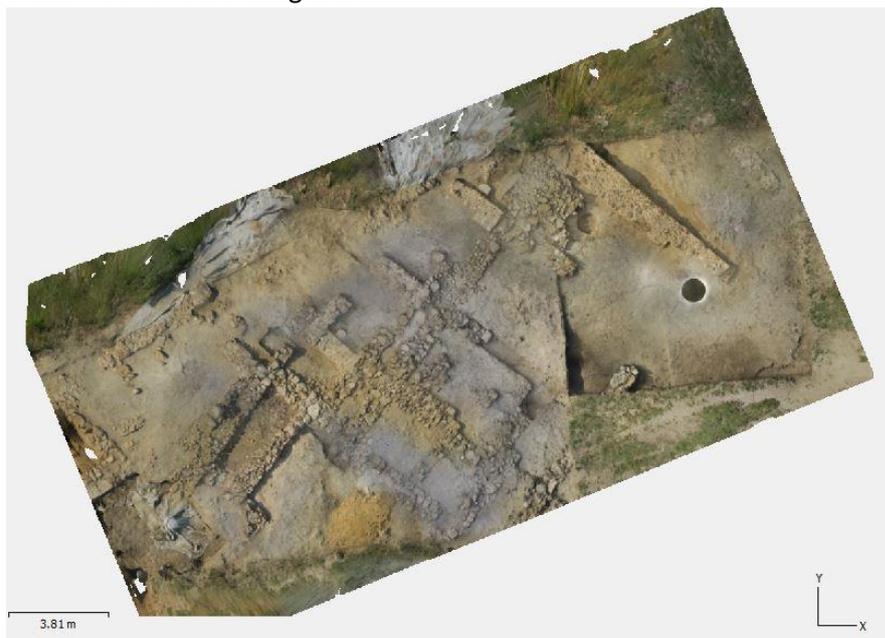


Figura 3.40. Ortomosaico. Corte 10-sector 2

Al exportar el formato TIFF a QGIS se pueden realizar consultas métricas, por ejemplo, una longitud, las coordenadas de un punto, etc. Figura 3.43.

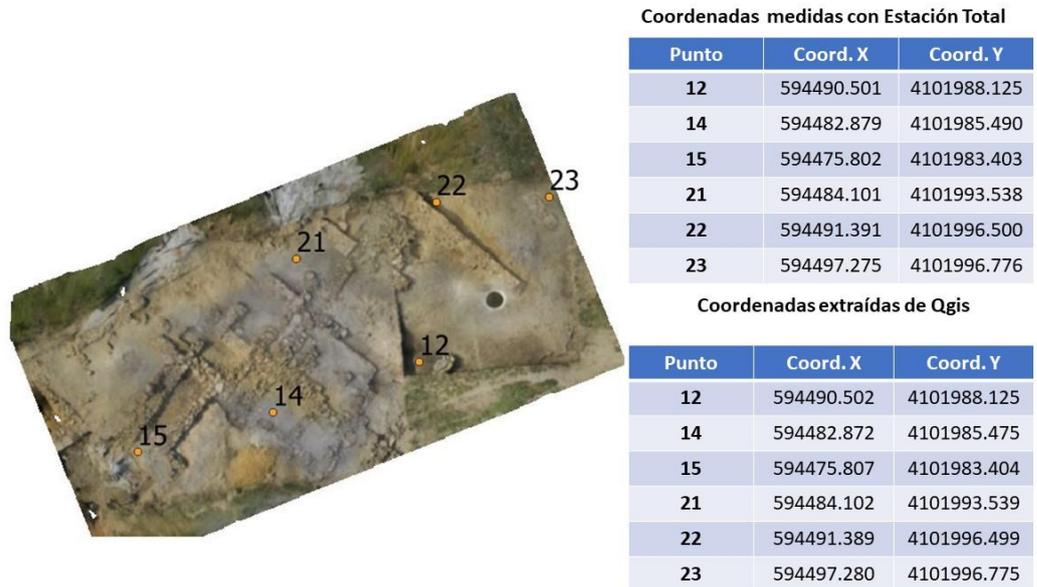


Figura 3.41. Ortomosaico en QGIS con comparativa de coordenadas

3.6. Resultado Corte 11

Los resultados de los cortes 11 y 12 confirman la localización de un edificio singular, de grandes proporciones, relacionado con un pozo para extraer agua de un manantial termal. El edificio podría arrancar en época fenicio-púnica y continuaría su uso hasta época romana. Aunque no disponemos de datos concluyentes, es posible manejar la hipótesis de un origen cultural para el edificio, lo que quizás contribuyera a explicar su monumentalidad. El corte 11 está formado por los sectores C, D y F, y su estudio fotogramétrico se realizó en la campaña de 2019.

Sector C

- Toma de fotografías: Se tomaron 111 fotografías y todas ellas se orientaron a calidad alta. La disposición de las cámaras quedaría como en la figura 3.44.

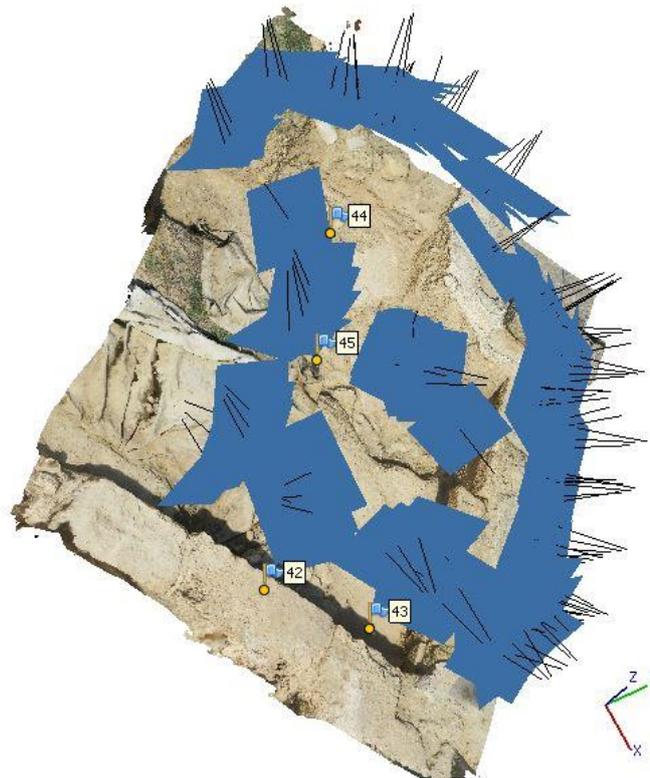


Figura 3.42. Disposición de cámaras. Corte 11- sector C

- Solape: Buen solapamiento, según observamos en la figura 3.45.

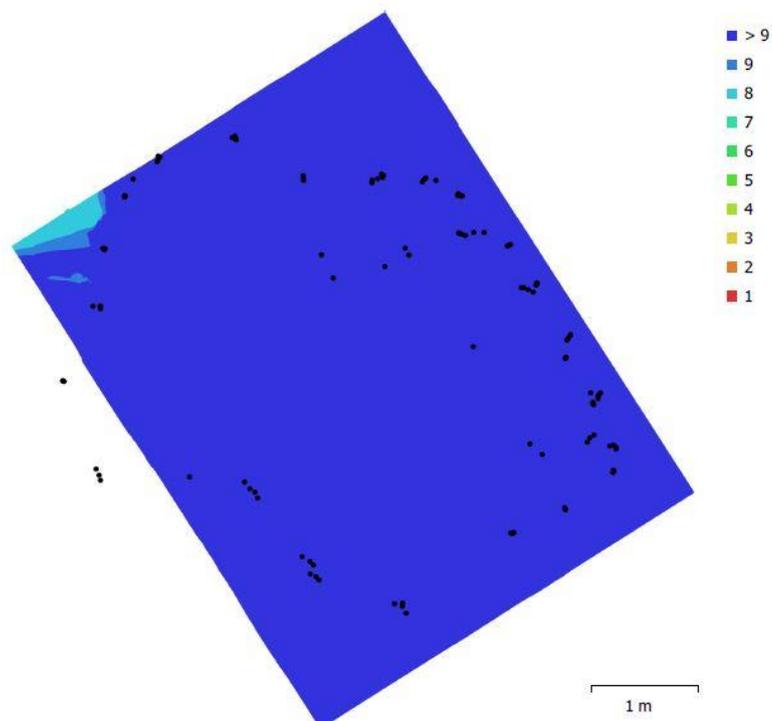


Figura 3.43. Solape. Corte 11-sector C

- Nube de puntos dispersa: Con una precisión alta se obtiene una nube dispersa con 76.183 puntos. Figura 3.46.



Figura 3.44. Nube de puntos dispersa. Corte 11-sector C

- Colocación de puntos de control y errores cometidos: En este corte se colocan 4 marcadores, se validaron todos en cada una de las fotos. Figura 3.47.

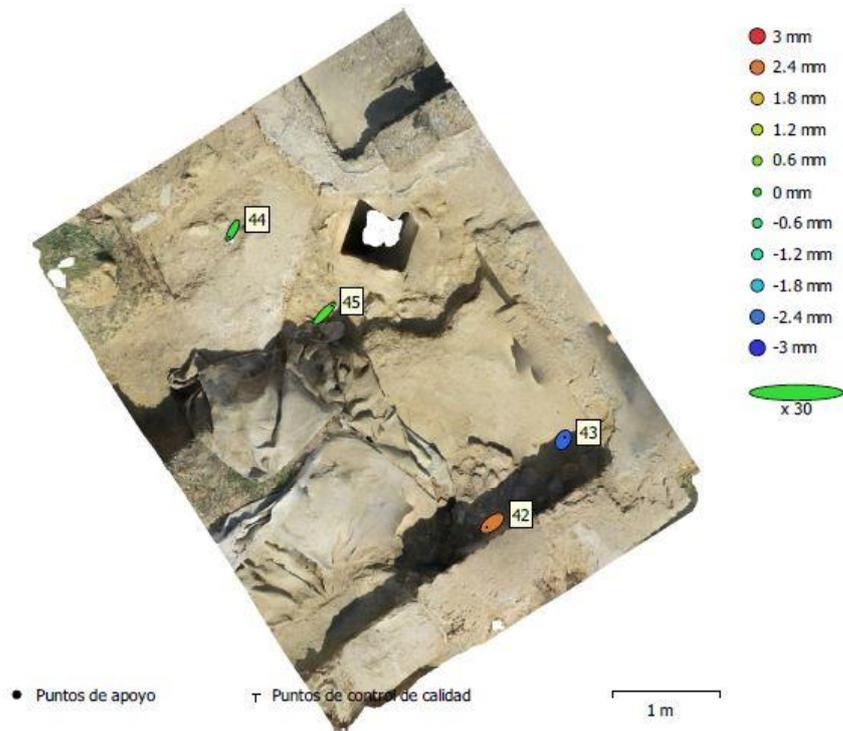


Figura 3.45. Posiciones de GCP y estimación de errores. Corte 11-sector C

Seguidamente se realiza la optimización para disminuir el error de orientación, se obtienen los valores expuestos en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Errores de GCP. Corte 11-sector C

Nombre	Error en X (mm)	Error en Y (mm)	Error en Z (mm)	Total (mm)	Imagen (pix)
44	-2.234	-4.135	-0.085	4.700	0.904(51)
42	-3.311	-2.511	2.366	4.782	0.956(59)
43	0.920	1.836	-2.533	3.260	0.710(58)
44	4.625	4.810	0.252	6.678	0.983(94)
Error medio Total	3.090	3.533	1.738	5.004	0.908

- Nube de puntos densa: Se procesó en calidad media, la nube dispersa, se obtuvieron 6.845.939 puntos, con un nivel de filtrado leve. Figura 3.48.



Figura 3.46. Nube de puntos densa. Corte 11-sector C

- Malla: Se realiza a calidad media y nivel de filtrado leve. Se selecciona parámetros de reconstrucción, arbitrario y con ello se obtienen, 456.382 caras y 230.352 vértices. Figura 3.49.

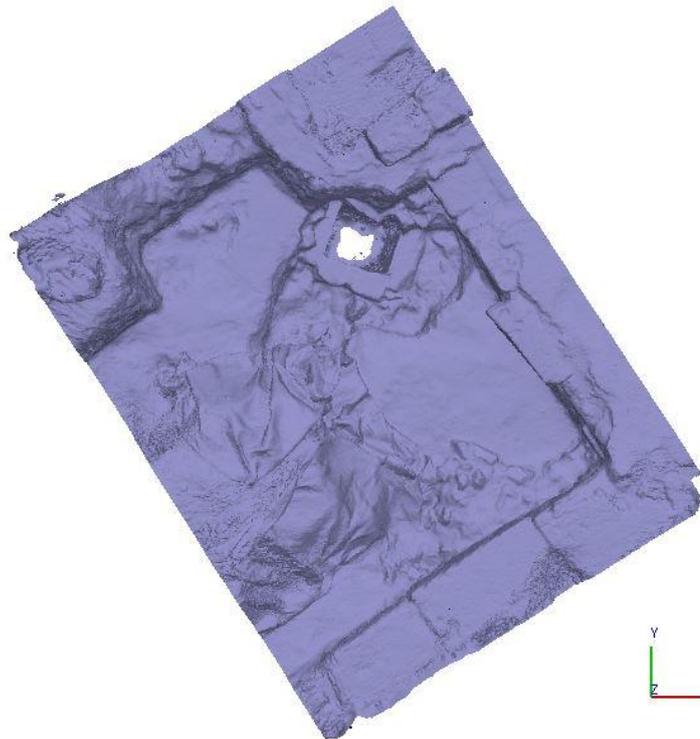


Figura 3.47. Malla sombreada. Corte 11-sector C

- Textura: Se incorpora al modelo los colores de los píxeles. Se realiza con modo de mezcla en mosaico. Figura 3.50.

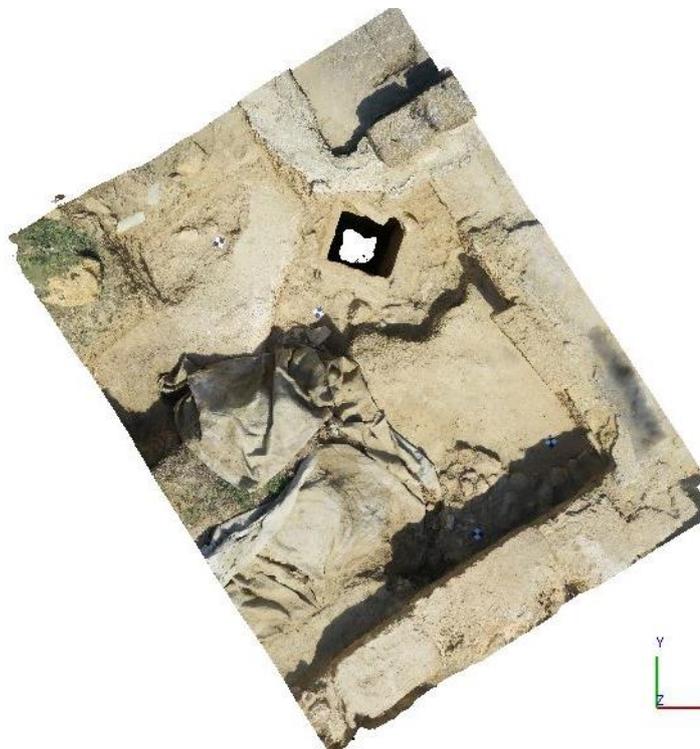


Figura 3.48. Modelo con textura. Corte 11-sector C

- Modelo Digital de Elevaciones (MDE): Se realiza con proyección planar desde arriba en XY, a partir de la nube de puntos densa y con la interpolación habilitada. La

resolución con la que se realizará el modelo es de 0.003 mm, con un tamaño total (pix) 2670 x 2872. Figura 3.51.

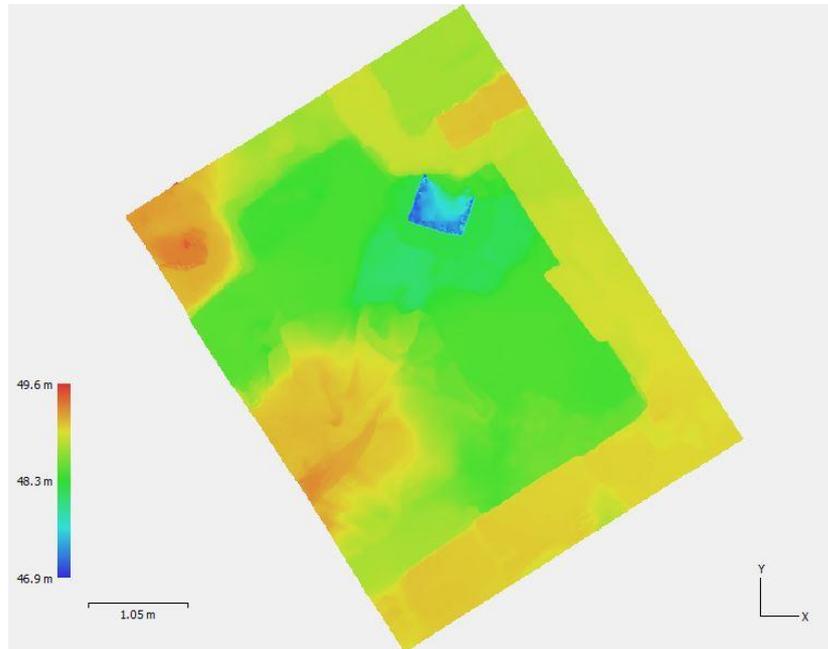


Figura 3.49. MDE. Corte 11-sector C

- Curvas de Nivel: La altitud mínima en el corte es de 46.91 m y la máxima 49.65 m. Se ejecutan a una equidistancia de 0.2. Figura 3.52.

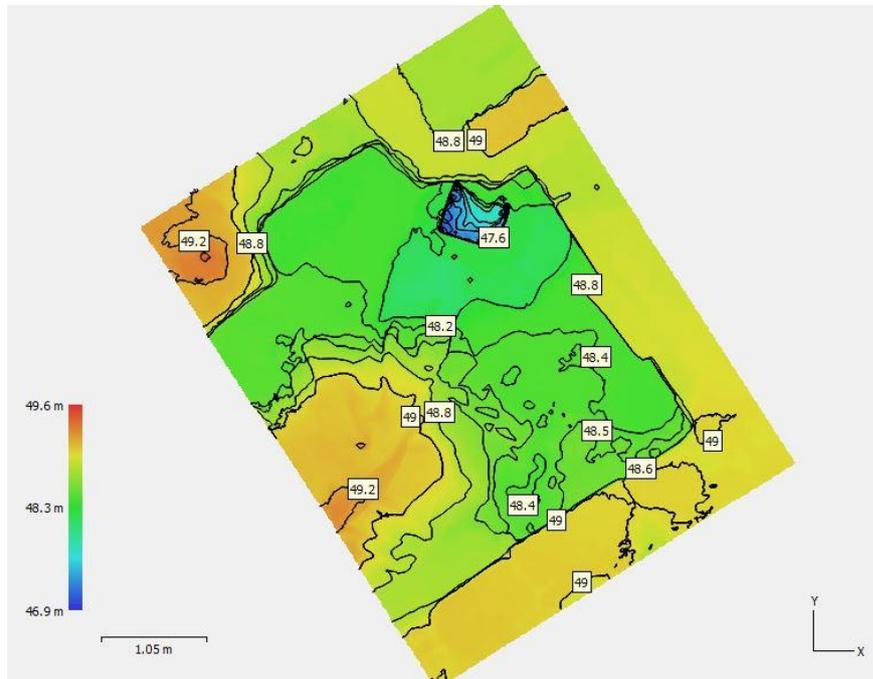


Figura 3.50. Curvas de nivel a 0.2m. Corte 11-sector C

- Ortomosaico: Se genera en proyección planar y con un tamaño de píxel de 0.0006 m. Figura 3.53.

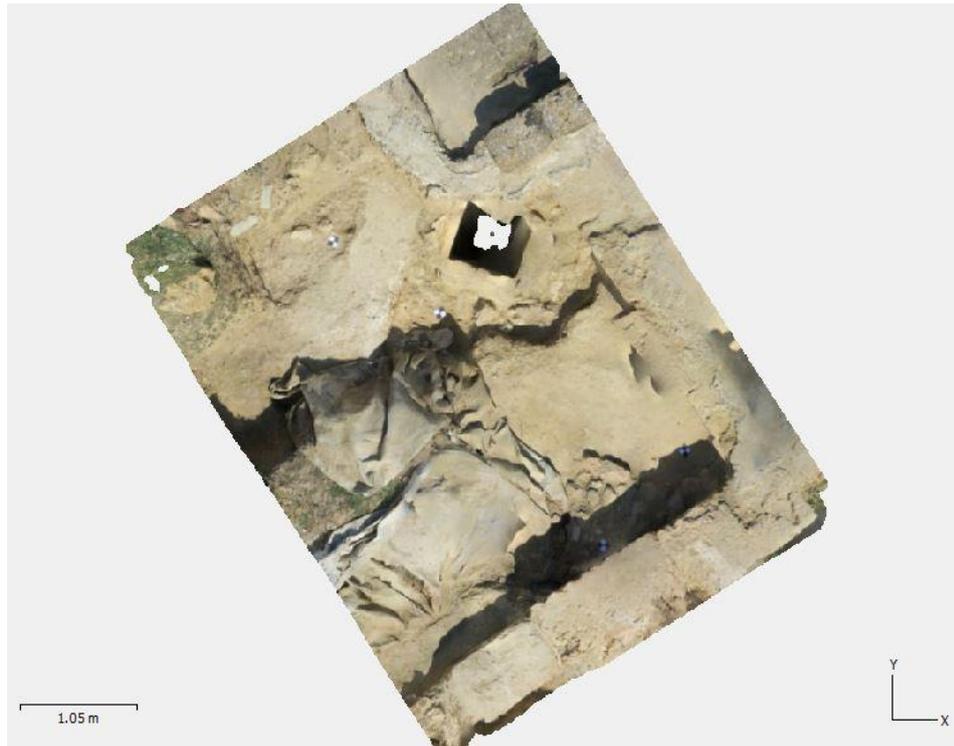


Figura 3.51. Ortomosaico. Corte 11-sector C

Con este resultado, exportando la ortofoto en formato TIFF se puede trabajar en QGIS para realizar consultas a escala 1:1, obteniéndose medidas reales. Figura 3.54.



Coordenadas medidas con Estación Total

Puntos	Coord. X	Coord. Y
42	594527.104	4101990.493
43	594527.823	4101991.334
44	594524.708	4101993.215
45	594525.655	4101992.561

Coordenadas extraídas por Qgis

Puntos	Coord. X	Coord. Y
42	594527.785	4101992.121
43	594528.509	4101992.966
44	594525.389	4101994.842
45	594526.343	4101994.196

Figura 3.52. Comparativa métrica en QGIS

Sector D

- Toma de fotografías: Se tomaron 497 fotografías, se orientaron con precisión alta, de todas ellas, se orientaron 495. Figura 3.55.

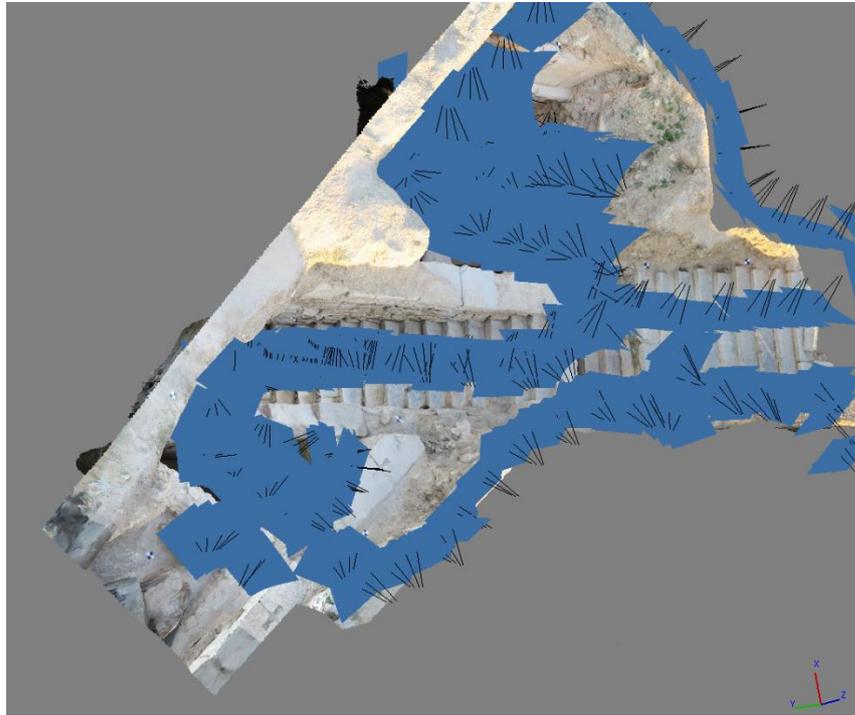


Figura 3.53. Distribución de cámara. Corte 11-sector D

- Solape: El resultado de una buena toma de fotografías, viene designado por el buen solapamiento que se produzca, en nuestro caso hay un buen resultado. Figura 3.56.

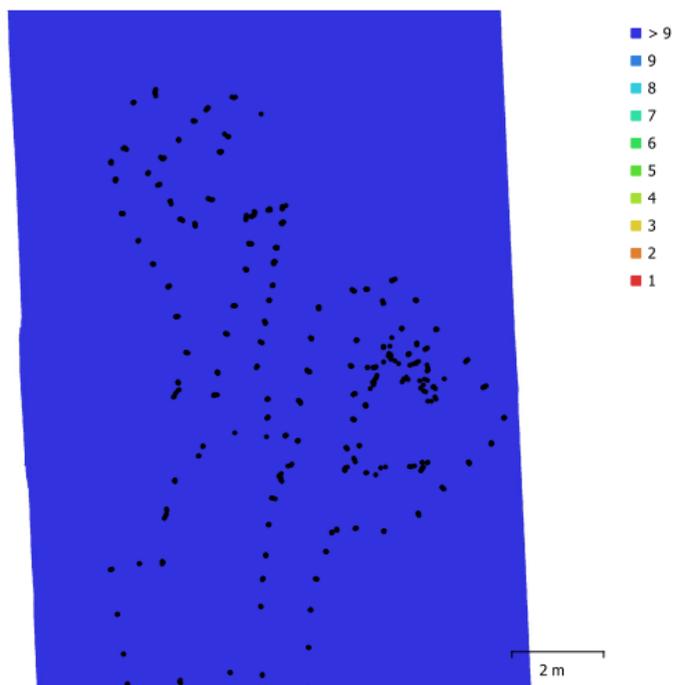


Figura 3.54. Solape. Corte 11-sector D

- Nube dispersa: Se genera a precisión alta y se crean 473.116 puntos. Figura 3.57.



Figura 3.55. Nube de puntos dispersa. Corte 11-sector D

Colocación de puntos de control y errores cometidos. En este corte se colocaron 18 marcadores, pero el 14 se perdió, por lo que no hay datos de él. Figura 3.58.

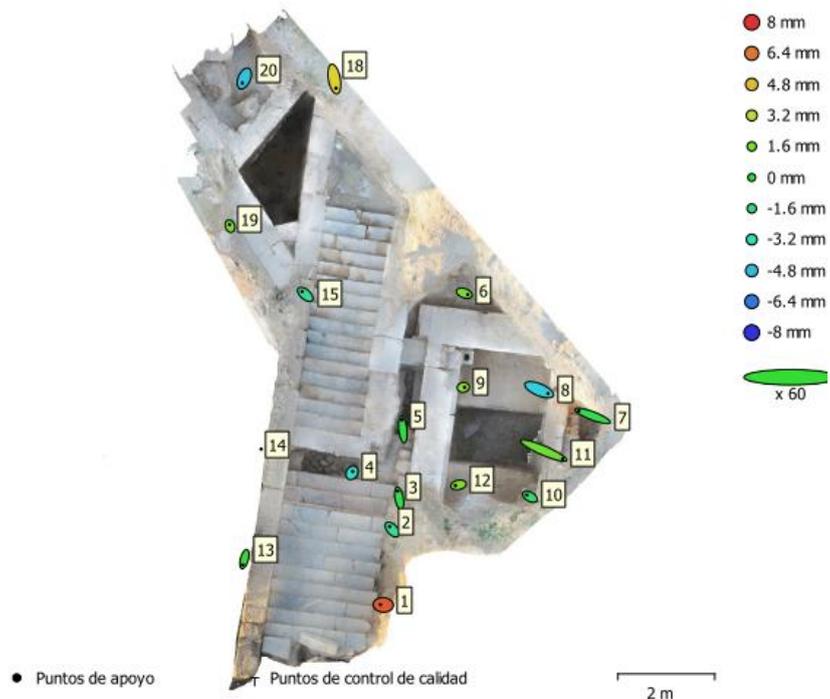


Figura 3.56. Posiciones de GCP. Corte 11-sector D

Al realizar la optimización de los GCP llegamos a obtener un error medio milimétrico. Tabla 3.8.

Tabla 3. 8. Errores de los GCP. Corte 11-sector D

Nombre	Error en X (mm)	Error en Y (mm)	Error en Z (mm)	Total (mm)	Imagen (pix)
13	-1.057	-3.967	0.116	4.107	0.262(8)
6	2.365	-0.855	1.613	2.986	0.522(23)
15	-2.273	1.907	-2.141	3.682	0.478(43)
1	-1.904	0.138	7.079	7.332	0.419(19)
2	-1.789	2.032	-2.404	3.620	0.461(38)
3	-0.944	5.066	-0.570	5.185	0.399(36)
4	0.561	0.980	-3.536	3.712	0.347(13)
5	-0.706	6.543	-0.351	6.590	0.194(11)
7	-9.399	3.573	-0.580	10.072	0.357(11)
8	6.034	-2.530	-4.324	7.843	0.402(82)
9	0.896	0.145	2.085	2.274	0.346(60)
10	-2.091	1.226	-1.409	2.804	0.376(60)
12	-2.144	-0.473	1.736	2.799	0.318(53)
11	12.994	-5.596	1.448	14.222	0.255(10)
18	1.139	-6.239	4.268	7.644	0.402(15)
19	-0.350	1.149	1.611	2.009	0.416(31)
20	-1.333	-3.161	-4.641	5.772	0.572(9)
14					
Error medio Total	4.386	3.399	2.959	6.288	0.398

- Nube de puntos densa: Se procesó a calidad media con nivel de filtrado moderado. Se obtuvieron 50.230.615 puntos. Figura 3.59.



Figura 3.57. Nube de puntos densa. Corte 11-sector D

- Malla: Se procesa a calidad media a partir de la nube de puntos densa y con formato de superficie arbitrario. Se obtienen 5.264.881 cara y 2.637.883 vértices. Figura 3.60.

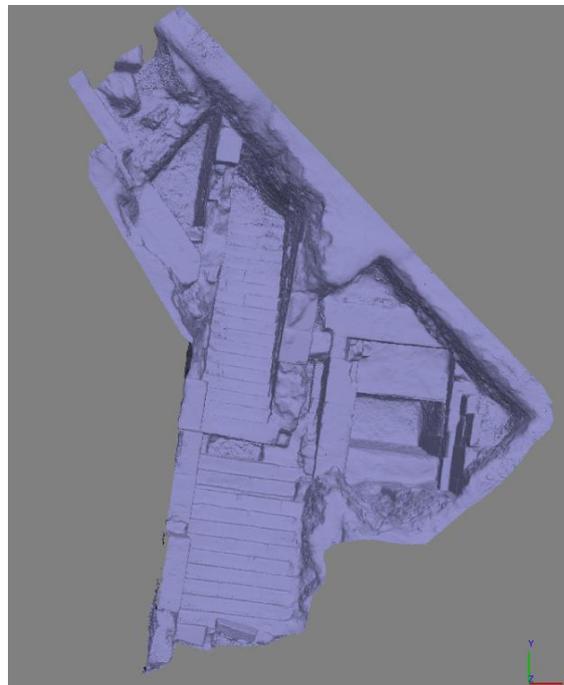


Figura 3.58. Malla sombreada. Corte 11-sector D

- Textura: Se incorporan en este proceso el color del píxel, se realiza en modo mapeado genérico y modo de mezcla en mosaico. Figura 3.61.



Figura 3.59. Modelo con textura. Corte 11-sector D



Figura 3.60. Distintas vistas del modelo con textura. Corte 11-sector D

- Modelo Digital de Elevaciones (MDE): La resolución con la que se realiza el modelo es de 0.003 m y con un tamaño de 4324 x 6450 m. Figura 3.63.

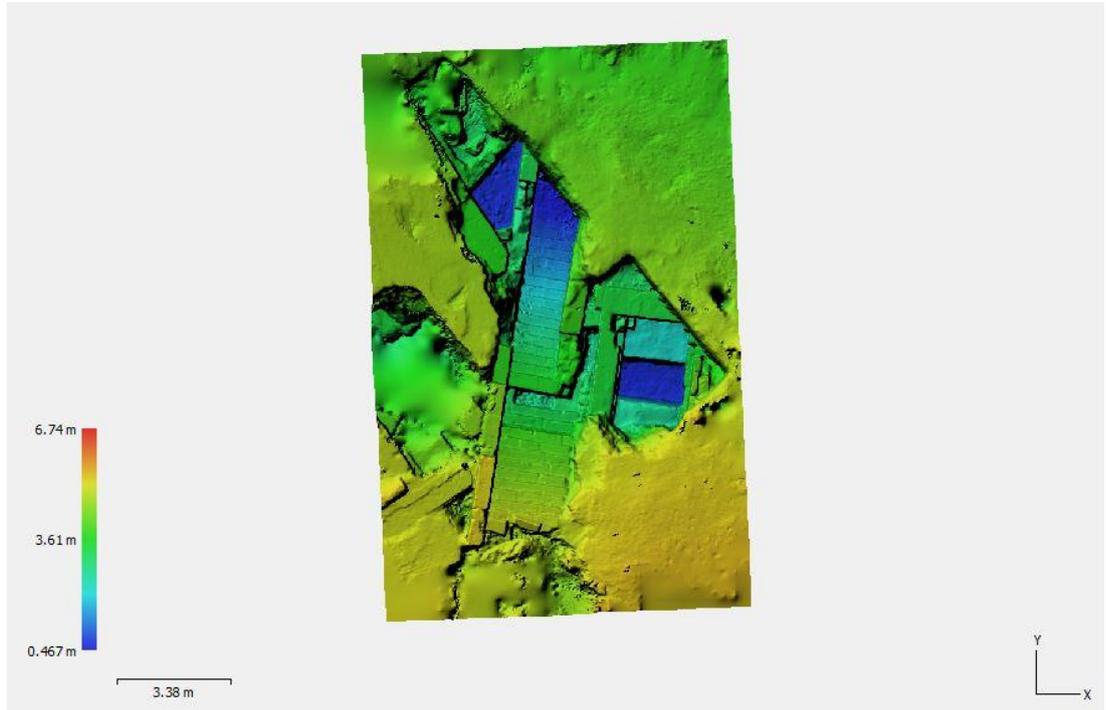


Figura 3.61. MDE con relieve. Corte 11-sector D

- Curvas de Nivel: La altitud mínima que nos encontramos en el corte 11, sector D, es de 0.467 m y la máxima a 6.744 m, se generan las curvas de nivel a equidistancia de 0.5 m. Figura 3.64.

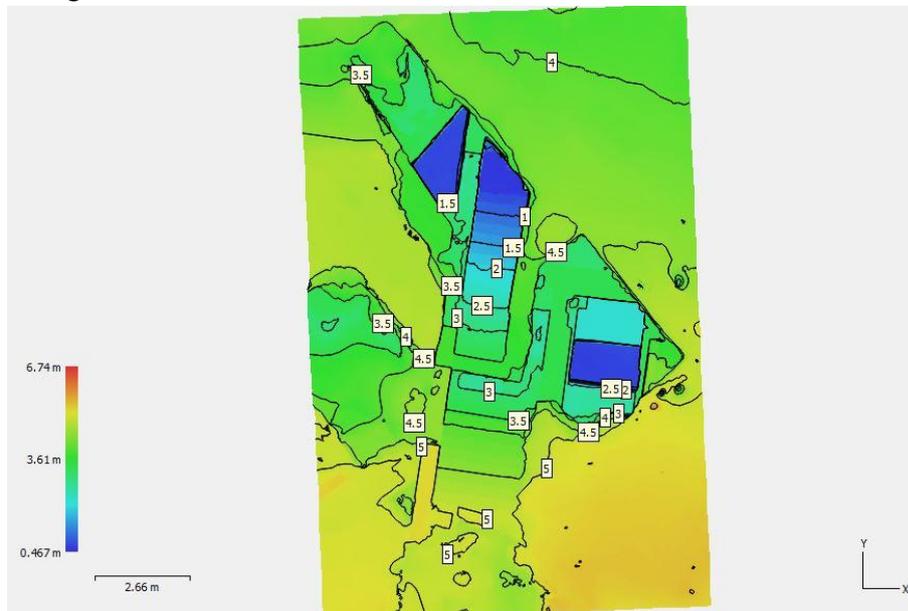


Figura 3.62. Curvas de nivel en el MDE. Corte 11-sector D

- Ortomosaico: El proceso de generar el ortomosaico en el corte 11, sector D, se realiza con un tamaño de píxel de 0.0007 m, se exporta en formato TIFF. Figura 3.65.



Figura 3.63. Ortomosaico. Corte 11-sector D

El tener una ortofoto nos da esa visión ortogonal que siempre ha necesitado un arqueólogo y que ayuda a tener una visión completa de la zona a estudiar y analizar. Gracias a la digitalización realizada sobre la ortofoto en QGIS, (figura 3.66), se puede identificar cada uno de los elementos que contiene el corte. Con esta identificación se elabora un listado con la tipología, dimensiones y demás características que se necesita registrar por un arqueólogo en cualquier corte.



Figura 3.64. Digitalización del Corte 11-sector D con QGIS

Otra posibilidad que nos da el tener una ortofoto es poder realizar alzados de los cortes, en la figura 3.65 se aprecia tres alzados del corte 11-sector D. Figura 3.67.

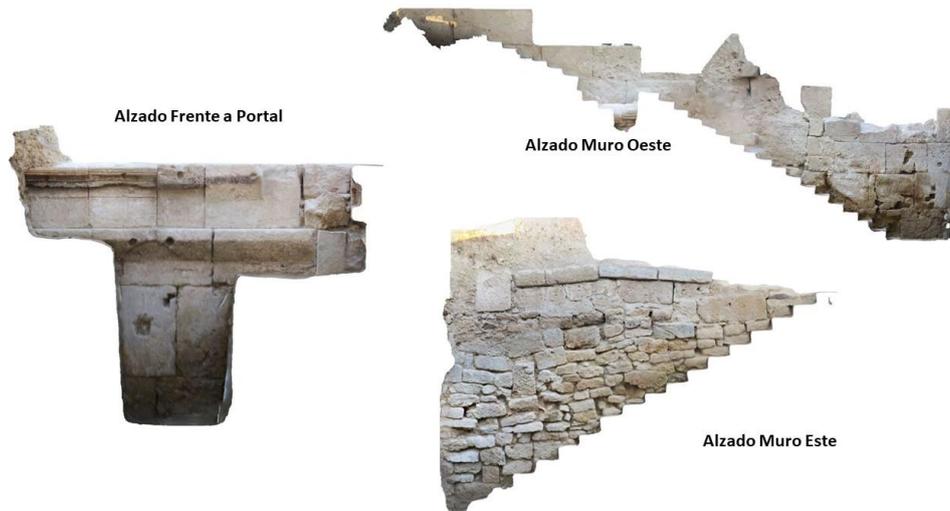


Figura 3.65. Alzados. Corte 11-sector D

Sector F

- Toma de fotografías: Se tomaron 542 fotografías y se orientaron a precisión alta, solo una de ellas no quedó alineada. En este corte se usaron distintas distancias focales en la toma de fotografías, de manera automática. Es un corte con bastantes desniveles y por ello se originó esta diversidad en la toma de fotografías. Figura 3.68.

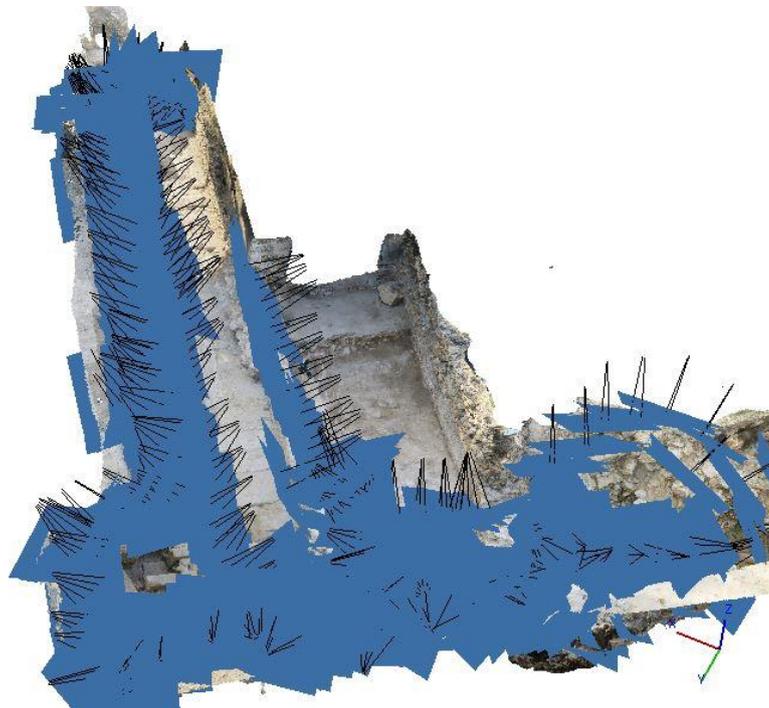


Figura 3.66. Disposición de cámaras. Corte 11-sector F

- Solape: Se producen un buen solapamiento de las imágenes. Figura 3.69.

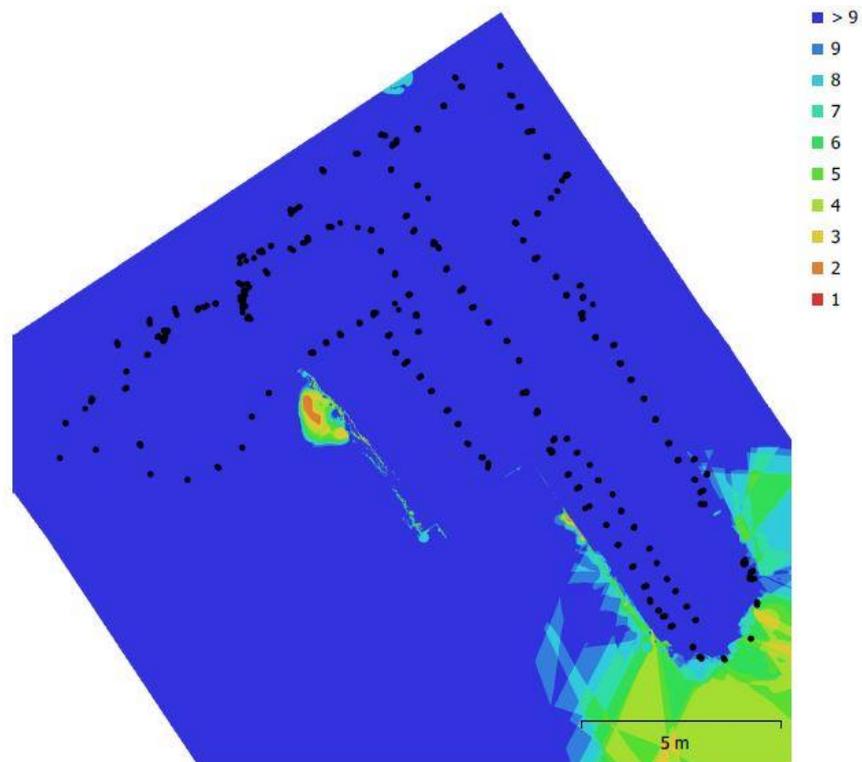


Figura 3.67. Solape de las imágenes. Corte 11-sector F

- Nube de puntos dispersa: Se origina al procesar con una precisión alta y se obtienen 513.918 puntos. Figura 3.70.



Figura 3.68. Nube de puntos dispersa. Corte 11-sector F

- Colocación de puntos de control y errores cometidos. Se colocaron 13 GCP, los errores se aproximaron al centímetro, pudiendo ser la causa el gran tamaño del

corte y la cantidad de desnivel existente, sumado a las distintas distancias focales empleadas en la toma de fotografías. Figura 3.71.

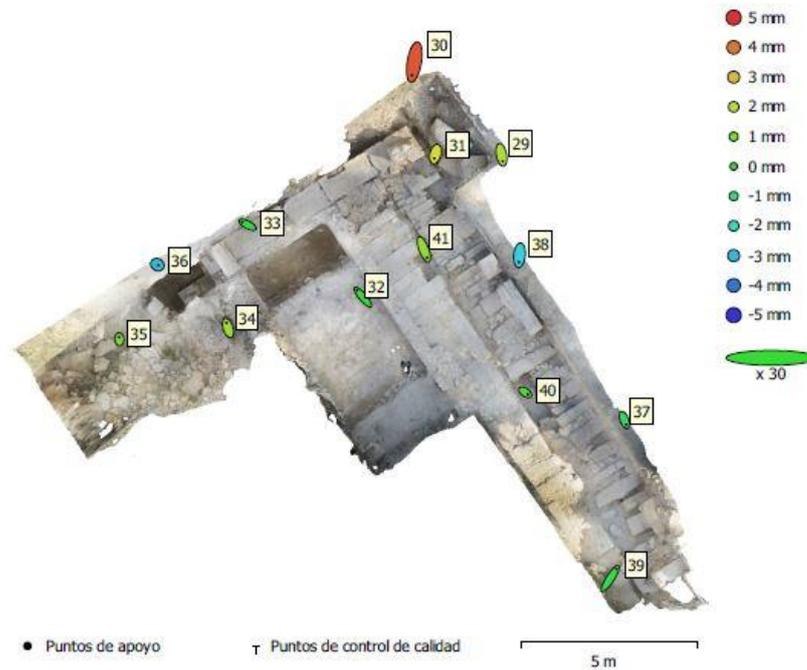


Figura 3.69. Posiciones y estimación de errores de los GCP. Corte 11-sector F

Se procede a la optimización de los 13 GCP para disminuir el error y mejorar la orientación de todas las imágenes.

Tabla 3. 8. Errores de GCP. Corte 11-sector F

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
39	1.138	1.789	-0.033	2.121	1.879(18)
34	-0.293	0.990	0.154	1.044	0.671(8)
30	-0.421	-2.523	0.446	2.597	0.002(1)
40	0.510	-0.352	0.052	0.622	0.546(28)
41	0.589	-1.556	0.141	1.670	0.553(34)
31	-0.205	-0.837	0.239	0.894	0.836(12)
29	0.231	-1.212	0.183	1.247	0.001(1)
38	-0.122	-1.275	-0.268	1.308	0.916(15)
37	0.310	-0.872	-0.065	0.928	0.098(4)
33	-0.959	0.508	-0.016	1.085	0.483(55)
32	-1.096	1.287	-0.007	1.687	0.494(12)
36	0.149	-0.098	-0.297	0.346	0.776(15)
35	-0.027	0.416	0.100	0.429	0.411(34)
Error Medio Total	0.589	1.232	0.198	1.380	0.762

- Nube de puntos densa: Se proceso a calidad media con nivel de filtrado leve y se obtuvo 69.188.344 puntos. Figura 3.72.



Figura 3.70. Nube de puntos densa. Corte 11-sector F

- Malla: Se procesa a calidad media y con parámetros de reconstrucción arbitrario a partir de la nube de puntos densa y con la interpolación habilitada. Se generan 3.741.832 caras y 1.877.202 vértices. Figura 3.73.

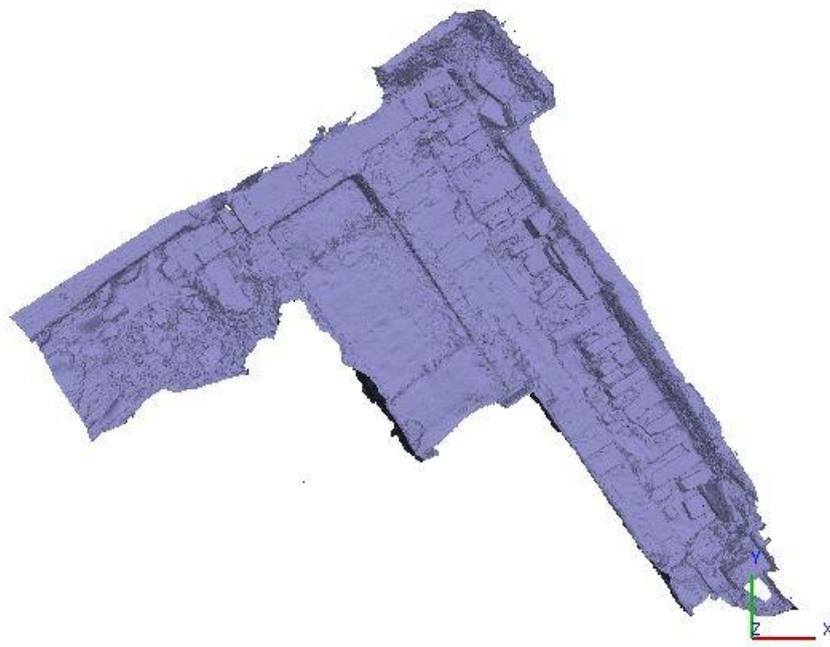


Figura 3.71. Malla sombreada. Corte 11-sector F

- Textura: Se le asigna a la malla generada, que ya es considerado un modelo 3D el color del píxel correspondiente, y con ello obtenemos un modelo con su textura. Se realiza con modo de mapeado genérico y modo de mezcla en mosaico. Figura 3.74.

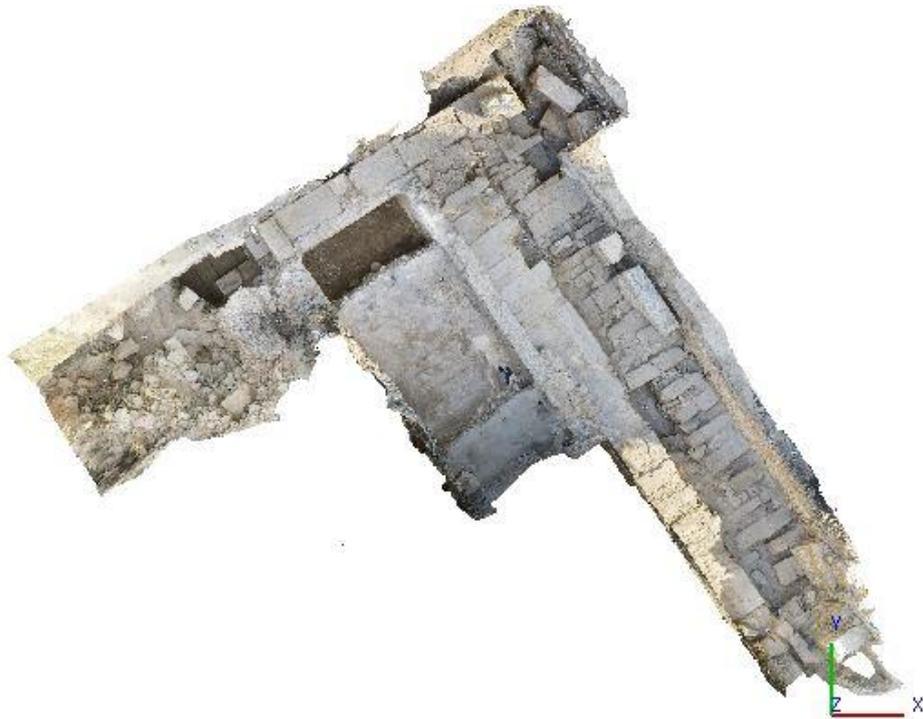


Figura 3.72. Modelo con textura. Corte 11-sector F

- Modelo Digital de Elevaciones (MDE): Se realiza con proyección planar, con una resolución de 0.002 m y un tamaño total de 12020 x 12374 de píxel. Figura 3.75.

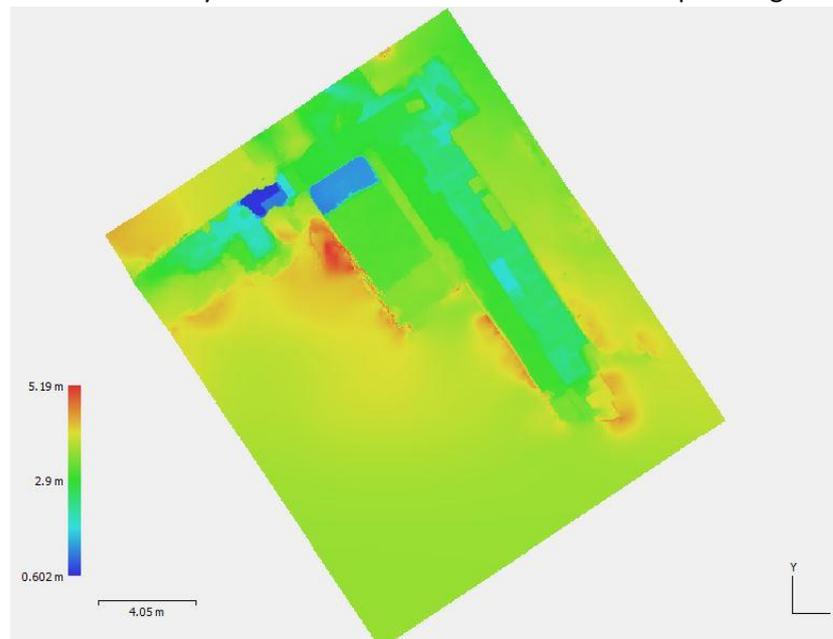


Figura 3.73. MDE. Corte 11-sector F

- Curvas de Nivel: La altitud mínima que nos encontramos en este corte es de 0.60 m. y la máxima de 5.19 m. Se procesan las curvas a una equidistancia de 0.5 m. Figura 3.76.

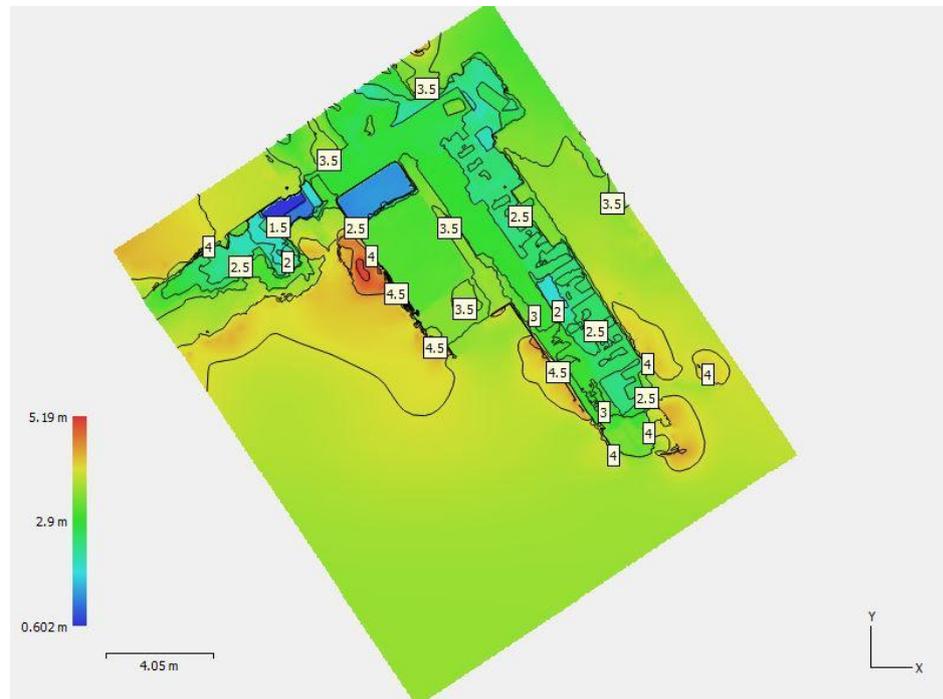


Figura 3.74. Curvas de nivel a 0.5m. Corte 11-sector F

- Orto Mosaico: Se genera con un tamaño de 0.0005 píxel, con proyección planar. Se exporta en formato TIFF. Figura 3.77.

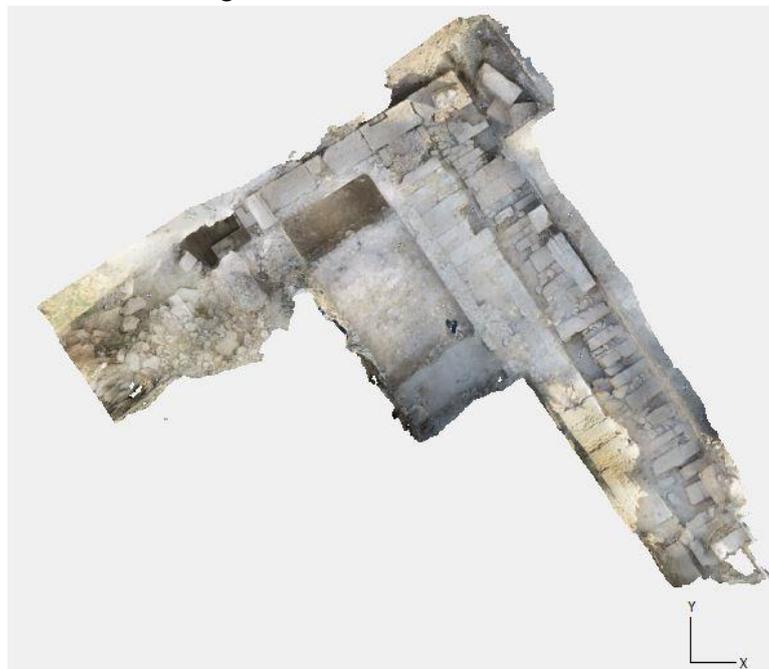


Figura 3.75. Ortomosaico. Corte 11-sector F

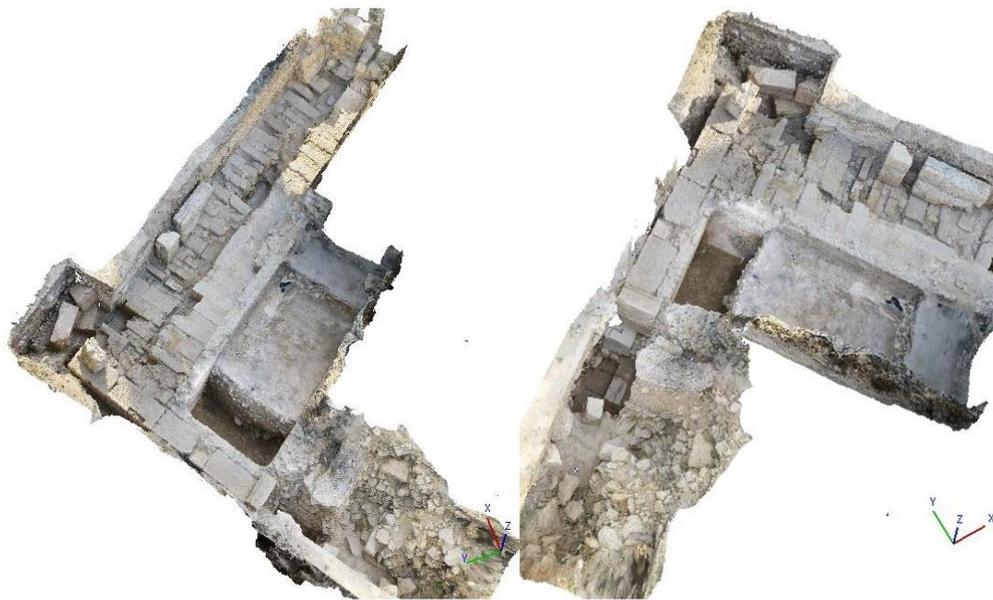


Figura 3.76. Vistas 3D de modelo con textura. Corte 11-sector F

3.7. Resumen de resultados de Cortes

En este apartado se resumen los resultados de los cortes. En la tabla 3.10 se muestra un resumen del proceso llevado a cada uno de los cortes.

Tabla 3.9. Resultado SfM de los Cortes

SfM	Corte 20	Corte 10- sector 1	Corte 10- sector 2	Corte 11- sector C	Corte 11- sector D	Corte 11- sector F
Número de fotos	475	372	476	111	495	542
Puntos clave/puntos de paso (key point limit/tie point limit)	40000/4000	40000/4000	20000/4000	40000/4000	40000/4000	40000/4000
Número de puntos x 10 ³	393	370	671	76	473	514
Parámetros de la nube densa (Quality/filter mode)	Low/Aggressive	Medium/Aggressive	Medium/Moderate	Medium/mild	Medium/Moderate	Medium/mild
Puntos nube densa x 10 ³	8000	29000	44000	6900	50231	69188
Parámetros de la malla (Surface type/ Source data/Face count/interpolation)	Abitrary/dense / low/enabled	Abitrary/dense medium/enable	Low relief/dense/medium /enable	Abitrary/dense medium/enable	Abitrary/dense/medium/enable	Abitrary/dense/medium/enable
Vértices de la malla x 10 ³	496	750	1355	230	2637	1877
Parámetros de textura (Mapping mode/blending mode/textura size)	Generic/Mosaic 4096x4096	Generic/Mosaic 5000x5000	Generic/Mosaic/ 4096x4096	Generic/Mosaic/ 4096x4096	Generic/Mosaic/ 4096x4096	Generic/Mosaic/ 4096x4096

3.8. CONCLUSIONES

En este capítulo se ha podido comprobar la importancia de la georreferenciación en arqueología, que ayuda a poder realizar trabajos arqueológicos en distintas campañas quedando todo representado en el mismo sistema. Piezas y cortes se pueden quedar registrados el mismo día del descubrimiento o, mejor dicho, cuando las tareas de excavado y limpieza concluyan. Esto conllevaría un periodo de tiempo insignificante en relación con metodologías anteriores que exigían dibujar y registrar todo de forma manual.

Conocer y determinar las relaciones espaciales de los cortes arqueológicos constituye uno de los principales objetivos de la investigación arqueológica. A este respecto, los sistemas SfM han demostrado generar datos precisos para cumplir con este objetivo.

La ortofoto obtenida está a escala 1:1, esto es especialmente útil ya que, al insertarla, por ejemplo, en un software de sistemas de información geográfica permite consultar y generar datos, como coordenadas y distancias, con una precisión similar a la que se obtendría en una medición real de campo. Si a lo anterior se añade que la ortofoto se puede completar con un MDE, también se puede consultar información referente a las alturas de los elementos levantados, es decir, se cuenta con información 3D. Por tanto, el uso de la modelización basada en imágenes es muy eficiente en comparación con los sistemas tradicionales de trabajo de campo. Este sería el fundamento principal para dotar a las excavaciones arqueológicas de la implementación de dichas técnicas geomáticas para obtener información precisa y rápida de un hallazgo y, además, conservar la información de manera virtual, de modo que en cualquier momento esté disponible para su estudio, y no solo la representación que se haya realizado a modo de dibujo de la excavación siempre sujeta a las necesarias simplificaciones. Además, una vez realizado todo este proceso, no hace falta parar el trabajo de excavación para dibujar un estrato, ya que se puede realizar con fotografías, y al comprobar que el solape es bueno, se puede seguir adelante con los trabajos. Respecto a la precisión y la calidad en los métodos tradicionales, en lo que se refiere al número de puntos en los dibujos a mano, normalmente menos de 50 puntos por m² (López et al., 2016), la modelización 3D ofrece unos 500.000 puntos, aportando precisión milimétrica gracias a las técnicas digitales llevadas a cabo. Por tanto, los ortofotos, los planos de planta, las secciones y los modelos digitales de elevación suponen un avance cualitativo para una mejor comprensión de las excavaciones arqueológicas en general y los cortes concretos realizados en la ciudad de Utica en Túnez.

Como conclusión, se puede afirmar que las tecnologías digitales y la nueva instrumentación de aplicación en geomática están cambiando la forma en que se practica la arqueología al mejorar su registro, análisis y posterior difusión. De entre las diferentes técnicas de modelado en 3D, Structure from Motion (SfM) ha surgido recientemente como una nueva metodología que proporciona mejores resultados y una mayor resolución que los métodos tradicionales, como el dibujo de planos y la fotogrametría tradicional o algunas de las técnicas de grabación más avanzadas, y quedaría comprobar su utilidad y eficiencia frente al escaneo por láser o LiDAR.

Como se ha visto son múltiples las ventajas de la modelación 3D, pero en el caso concreto de la excavación arqueológica resulta que los arqueólogos necesitarían una formación especial para manejar el software y los dispositivos relacionados con la geomática. Por ello los equipos multidisciplinares son una solución hasta que esa situación ideal pudiese hacerse efectiva. Por otro lado, la adaptación del *software* a los requisitos arqueológicos parece ser una tarea pendiente para el futuro. Los sistemas de registro arqueológico deberían incorporar software

de fácil uso para capturar las características arqueológicas y reproducir el sitio tal como apareció cuando fue excavado.

3.7. Referencias

- Barceló, J. A., De Castro, O., Travet, D., & Vicente, O. (2003). A 3D model of an archaeological excavation. *The Digital Heritage of Archaeology. Computer Applications and Quantitative methods in Archaeology*, (33), 85.
- Barker, P. (1993). *Techniques of archaeological excavation*. Psychology Press.
- Buill Pozuelo, F. (2003). Fotogrametría analítica.
- Chapman, H. P., & Van de Noort, R. (2001). High-resolution wetland prospection, using GPS and GIS: landscape studies at Sutton Common (South Yorkshire), and Meare Village East (Somerset). *Journal of Archaeological Science*, 28(4), 365-375.
- Collis, J. (1996). *Digging up the past: an introduction to archaeological excavation*. The History Press.
- Dorrell, P. G. (1994). *Photography in archaeology and conservation*. Cambridge University Press.
- Furukawa, Y., & Ponce, J. (2010). Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), 1362-1376. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.161>.
- Li, X., Ge, M., Dai, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J., & Schuh, H. (2015). Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. *Journal of Geodesy*, 89(6), 607-635.
- López, J. B., Jiménez, G. A., Romero, M. S., García, E. A., Martín, S. F., Medina, A. L., & Guerrero, J. E. (2016). 3D modelling in archaeology: The application of Structure from Motion methods to the study of the megalithic necropolis of Panoria (Granada, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10, 495-506.
- Lowe, D.G. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. In Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision (Vol. 2, pp. 1150-1157). Kerkyra, Greece. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1999.790410>
- Lucas Jr, H. C., & Goh, J. M. (2009). Disruptive technology: How Kodak missed the digital photography revolution. *The Journal of Strategic Information Systems*, 18(1), 46-55.
- Mali, V. K., & Kuiry, S. N. (2018). Assessing the accuracy of high-resolution topographic data generated using freely available packages based on SfM-MVS approach. *Measurement*, 124, 338-350.
- Monchambert J.-Y., Jerbania I.B., M. Belarbi, L. Bonadies, H. Bricchi-Duhem, M. De Jonghe, Y. Gallet, J. Nacef, Y., A. Tekki, E. Thébault, S. Vermeulen. Utique, Rapport préliminaire sur les deux premières campagnes de fouilles de la mission francotunisienne, 2011 et 2012.
- Mora Torcal, R., Martínez-Moreno, J., Roda Gilabert, X., Roy Sinyer, M., Vega Bolivar, S., (2014). Treballs d'Arqueologia, Nº20.

- Pereira Uzal, J. M. (2013). Modelado 3D en patrimonio cultural por técnicas de structure from motion. ph investigación
- Renfrew, C., & Bahn, P. (2007). Arqueología: Teorías, Métodos y Práctica (Tercera ed.). (M. J. Mosquera Rial, Trad.) Madrid: Akal
- Renfrew, C., & Bahn, P. (2008). Arqueología conceptos clave. (D. Govantes, Trad.) Madrid: Akal.
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018). Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*, 10(10), 1606.
- Shanks, M., & Svabo, C. (2013). Archaeology and photography: A pragmatology. In *Reclaiming Archaeology* (pp. 105-118). Routledge.
- Teixidó, T., Peña, J. A., López Castro, J. L., Ibáñez Castro, A., Sierra, M., & Ferjaoui, A. (2012). Prospección magnética y georrádar 3D para delimitación y caracterización de yacimientos arqueológicos: casos de estudio. <https://digibug.ugr.es/handle/10481/23534>.
- Teixidó, M. T., & Peña, J. A. (2019). The Utility of Geophysical Models in Archaeology: Illustrative Case Studies. In *Archaeogeophysics* (pp. 169-181). Springer, Cham.
- Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., Abellán, A., & Jordá, L. (2016). Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos.
- Verhoeven, G., Doneus, M., Briese, C., & Vermeulen, F. (2012). Mapping by matching: A computer visión-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. *Journal of Archaeological Science*, 39(7), 2060-2070. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.02.022>.
- Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014). Terrestrial and Close-Range Photogrammetry. *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*.
- Wu, C. (2013). Towards linear-time incremental structure from motion. Proceedings- 2013 International Conference on 3D Vision, 3DV 2013, 127-134. <https://doi.org/10.1109/3DV.2013.25>.

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA vs HDS A EXCAVACIONES: CANTILLANA

Índice

CAPÍTULO 4

4. APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA vs HDS A EXCAVACIONES: CANTILLANA	123
4.1 Introducción	123
4.2 Descripción del Corte	124
4.3 Georreferenciación de la zona	125
4.4 Técnicas SfM	127
4.4.1 Metodología SfM	127
4.4.2 Resultados: Modelo Digital de Elevaciones y Ortomosaico	136
4.5 Técnicas HDS	138
4.5.1 Metodología HDS	138
4.5.2 Resultados: Nube de puntos	142
4.6 Comparativa SfM y HDS	142
4.6.1. Comparativa SfM vs TCR705	145
4.6.2. Comparativa P20 vs GCP DE TCR705	147
4.6.3. Comparativa P20 vs Modelo SFM	148
4.6.4. Conclusiones de las comparativas	148
4.7. Conclusiones	149
4.8. Referencias	150

Índice de Figuras

Figura 4.1: Situación del Mosaico de Cantillana	124
Figura 4.2: Mosaico Naeva	124
Figura 4.3: Flujo de trabajo en mosaico Naeva	125
Figura 4.4: GNSS como base	126
Figura 4. 5: Tomas de GCP. Mosaico Naeva	127
Figura 4.6: GCP en distintas zonas del mosaico	128
Figura 4.7:GCP con miniprisma	128
Figura 4.8: Toma de fotografías. Mosaico Naeva	129
Figura 4.9: Solape de fotografías	129
Figura 4.10: Flujo de trabajo en metodología SfM	130
Figura 4.11: Ajuste Bundle. Fuente: New York University, 2016	130
Figura 4.12: Nube dispersa. Mosaico Naeva	131
Figura 4.13: Errores en GCP	132
Figura 4.14: Nube de puntos densa. Mosaico Naeva	133
Figura 4.15: Imposición de medidas al objeto. Mosaico Naeva	134
Figura 4.16: Malla de alambre. Mosaico Naeva	135
Figura 4.17: Modelo con textura. Mosaico Navea	135
Figura 4.18: MDE. Mosaico Naeva	136
Figura 4.19: Curvas de nivel a 0.01m en sombreado de relieve. Mosaico Naeva	137
Figura 4.20: Ortomosaico. Mosaico Naeva	137
Figura 4.21: Esquema del método WFD. Fuente Leica Geosystems	139
Figura 4.22: Posiciones del escáner P20	139
Figura 4.23: Esquema de estacionamiento del escáner y posición de dianas	140
Figura 4.24: Característica de escaneo	140
Figura 4.25: Nube de puntos generada con HDS	142
Figura 4.26: Superposición de nube de puntos HDS sobre modelo SfM	143
Figura 4.27: Representación de puntos HDS sobre modelo en zona de sumidero	143
Figura 4.28: Vista de los puntos HDS que quedan por debajo del modelo SfM	144
Figura 4.29: Fragmento del mosaico con GCP en SfM	145
Figura 4.30: GCP sobre fragmento del mosaico con técnica SfM	146
Figura 4.31: Análisis de SfM & GCP en fragmento del mosaico	146
Figura 4.32: Análisis P20 & GCP de TCR705	147
Figura 4.33: Análisis SfM & P20	148
Figura 4.34: Efecto del láser en superficies como el mármol. Fuente: 3DRiskMapping 2008_	149

Índice de Tablas

Tabla 4.1: Errores de los GCP en el Mosaico Naeva	132
---	-----

4. APLICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA vs HDS A EXCAVACIONES: CANTILLANA

4.1 Introducción

En el ámbito de la geomática está apareciendo una nueva tecnología que mejora el trabajo de la Topografía más o menos cada 10 años. Los años 80 irrumpió de la estación total sin reflector (TPS), en los años 90 fue el GPS (Global Positioning System) (Wells et al. 1987), a principios de este siglo, año 2000, fueron el LiDAR (Light Detection and Ranging) (Cheng et al., 2018) o las imágenes de satélite. En la siguiente década, año 2010 ha irrumpido fuertemente el HDS (High Definition Surveying), una técnica prometedora en cuanto a velocidad, precisión, detalle y coste. Eso sí, todavía debe mostrar sus ventajas frente a lo que ya existe. A este sistema también se le suele denominar Terrestrial laser scanning (TLS) o a veces LiDAR terrestre. El primer sistema comercial TLS fue construido por Cyra Technologies en 1998 y posteriormente fue comprado por Leica en 2001 (Liang et al., 2016). El hardware TLS ha experimentado una rápida mejora en las últimas dos décadas (Large et al., 2009). El precio, el tamaño y el peso de los escáneres láser han bajado rápidamente, y también ha mejorado el aumento de la resolución espacial y la velocidad de medición (Gressin et al., 2013).

En esencia los instrumentos que ahora podemos llamar clásicos como TPS o GPS toman puntos de manera individual, mientras que los sistemas HDS suponen un escaneo laser en tres dimensiones que pueden registrar miles de puntos por segundo de medición (Yang et al., 2016). Se obtiene así una nube de puntos, aparentemente como si fuera una fotografía, pero cada punto tiene unas coordenadas (X, Y, Z) y un color asociado en el conocido formato RGB (Red, Green, Blue, o en español rojo, verde y azul) (Weinmann et al., 2011). A priori las mayores ventajas de los sistemas HDS son la alta velocidad en la captura de información, y el alto nivel de detalle asociado a una altísima precisión teórica. En general los sistemas TLS actuales suelen tener una alta resolución espacial milimétrica a decenas de metros de distancia de la estación, el error típico suele ser de ± 2 mm a 25 m (Puttonen et al., 2013).

La aplicación de las técnicas Geomática a la Arqueología es relativamente reciente, según la base de datos de Scopus, el primer trabajo en este sentido es del año 2007 (Kang et al., 2007), donde se apunta su posible utilización, pero no se realiza ningún trabajo arqueológico. Posteriormente en 2008, sí que se emplea en una excavación arqueológica en Egipto combinando los resultados fotogrametría aérea (Brechtken et al., 2008). Estas aplicaciones se van empleando tímidamente, o así lo demuestran las publicaciones relacionadas, una en 2009 (Boochs et al., 2009) relacionada con la modelización de la nube de puntos, mostrando que es una información tan desestructurada que es una tarea exigente para extraer información y que además requiere potentes herramientas de software. En 2010 sobre todo son aplicaciones arqueológicas en cuevas, como las de la Cueva del Paleolítico Superior de Parpalló en Gandía (Lerma et al., 2010), o las de la cueva de la edad de bronce "les fraux" en perigord (Francia) (Grussenmeyer et al., 2010). No es hasta 2012 cuando se plantean las comparaciones del TLS con la fotogrametría terrestre en aplicaciones arqueológicas (Fabris et al., 2012), concretamente con medidas realizadas a una parte del Palacio de Phaistos en la isla de Creta. En este caso los resultados muestran que en el registro del conjunto de datos había diferencias medias del orden de algunos centímetros, y destacaba una mejor capacidad por el TLS en las superficies para describir las porciones onduladas de las paredes del Palacio de Phaistos.

El objetivo de este capítulo es el análisis comparativo entre dos técnicas geomáticas de muy alta productividad como son la fotogrametría de objeto cercano mediante SfM y el láser escáner terrestre o HDS o TLS.

4.2 Descripción del Corte

Este trabajo surgió por la aparición de un mosaico en la población de Cantillana (Sevilla) debido a las obras para la mejora del saneamiento en la calle Sacristán José Díaz Hidalgo, en noviembre del 2017. El hallazgo, del siglo II d. C., generó un interés elevado y propició que el arqueólogo, encargado en la zona, determinara la necesidad de obtener la ubicación exacta del mosaico y, si era posible, recrear dicha pieza con medidas reales en un modelo 3D. La zona de trabajo se encuentra en las coordenadas geográficas 37°36'19,84"N, 5°49'34.

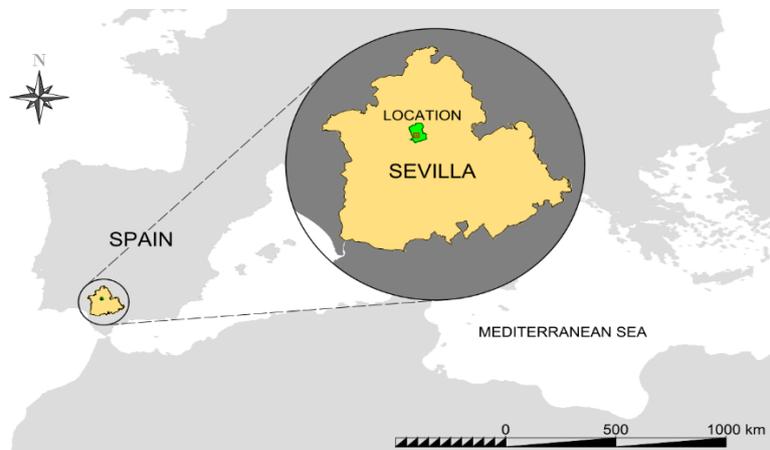


Figura 4.1. Situación del Mosaico de Cantillana

El hallazgo se catalogó como un *Impluvium* o zona de recogida de aguas (Sear, 2020), normalmente este tipo de recintos suelen ser aljibes rehundidos (den Hartog, 2007), pero en este caso todo el recinto formaba parte de este aljibe donde el desagüe se producía por un sumidero de mármol. La decoración del mosaico no deja indiferente, ya que representa un escenario acuático, un fondo marino con gran cantidad de especies marinas, con vistosos colores sobre un fondo blanco de teselas.



Figura 4.2. Mosaico Naeva

Los criterios en la forma de trabajar pasan por tener un resultado final del objeto o zona en cuestión a tamaño real, pero partiendo de la base que todo esté georreferenciado. Este criterio hace necesario implementar técnicas de geodesia y topografía para después, mediante fotogrametría o láser escáner, realizar la construcción del objeto o zona en cuestión.

Por todo ello se realizó la implantación de un sistema de coordenadas en la zona a trabajar, para poder tomar una serie de puntos que servirán para georreferenciar el mosaico hallado en Cantillana. Se emplearán dos técnicas para la obtención del modelo 3D, una por fotogrametría SfM y otra con láser escáner HDS, figura 4.3, lo que abrirá otras vías de investigación sobre el uso de una técnica u otra.

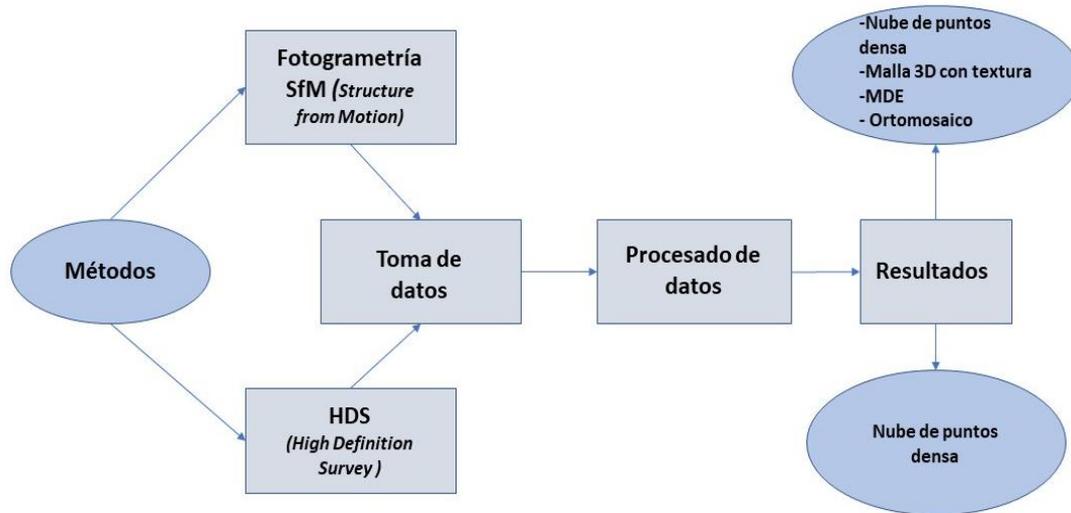


Figura 4.3. Flujo de trabajo en mosaico Naeva

4.3 Georreferenciación de la zona

Para el establecimiento de un sistema de coordenadas en la zona, se utilizó una pareja de GNSS Leica, modelo 1200 con antena GX1230 y unidad de control RX1250 en bastón. Estos equipos son bifrecuencia con precisión centimétrica en RTK. Se debe valorar las condiciones de la zona y la prestación de los equipos para elegir el modo de trabajo. Lo ideal sería trabajar en tiempo real, para ello se necesita un punto de coordenadas conocidas en la zona, cosa que no se tiene, o bien poder trabajar en tiempo real realizando conexión a alguna antena de referencia, bien privada o perteneciente a la Red de Posicionamiento Andaluza (RAP) teniendo conexión a internet. Como ninguna de las dos condiciones se daban, se optó por configurar uno de los equipos como base de referencia RTK, pero grabando datos para un futuro postproceso. Se ubicó la antena de referencia, figura 4.4, en una zona con cobertura suficiente para recibir datos de los satélites de forma ininterrumpida y a la vez emitiendo correcciones diferenciales al equipo móvil. Con ello se consigue una precisión relativa entre ambos de 2-3 cm en la determinación de coordenadas. Con el equipo móvil se colocaron puntos de coordenadas georreferenciadas en el sistema ETRS89, que es el oficial de la Península Ibérica. Dichos puntos se señalaron con unos clavos, de manera que sirvieran de referencia para volver a la zona en posteriores trabajos, como así ocurrió. Finalizados los trabajos de campo iniciales, ya en gabinete, se descargaron de

la RAP los datos necesarios, en formato RINEX, para realizar las correcciones necesarias. Los citados datos se tomaron de la antena más cercana a la zona de trabajo, en concreto la antena de Sevilla, denominada SEV1, de la cual se obtienen datos suficientes para poder corregir la posición de la antena de referencia, mediante cálculos realizados en post proceso y tener con precisión centimétrica las coordenadas de la base de referencia. Una vez corregidas las coordenadas de la base, se pueden corregir automáticamente las coordenadas de los puntos medidos desde el equipo móvil. El resultado final es la obtención de puntos con coordenadas UTM con buena precisión y con un margen de error local de 1-2 cm que es lo habitual en mediciones RTK de tiempo real, con aparatos similares a los utilizados.



Figura 4.4. GNSS como base

Una vez se establecieron los puntos de control para su posicionamiento absoluto se procedió a fijar las coordenadas de puntos de control locales, mediante estación total, modelo Leica TCR705 de precisión 15 cc. angulares y 2mm + 2ppm lineales.

El uso de la estación total se debe a que al necesitar mayor precisión para las metodologías que se implementaran en la zona de trabajo, SfM y HDS, es la estación total la que nos permite equiparar dicha precisión al milímetro, precisión que aportan ambas técnicas.

Con la estación total se realiza la medición de al menos dos puntos tomados previamente con el GNSS, para posteriormente densificar la zona con más puntos de control necesarios para las técnicas fotogramétrica, así como las dianas necesarias para la medición HDS. Todos los nuevos puntos se toman en coordenadas relativas. Para vincular estas con las coordenadas absolutas en UTM medidas con el GPS se realiza un trabajo previo.

Este trabajo previo consiste en eliminar la proyección UTM de los puntos medidos con GNSS, para ello hay que corregir el ángulo de convergencia y el coeficiente de anamorfosis lineal.

Estos cálculos se pueden realizar manualmente, punto a punto, pero se utiliza un comando existente en el software TAO, que funciona bajo AutoCad, realizando dicha eliminación

automáticamente, necesitando como dato previo la ondulación media del geoide existente en la zona.

Una vez que se tienen las coordenadas en relativas se pueden incorporar en AutoCad, los puntos de control medidos con estación y realizar un cambio de sistema de coordenadas para llevar esas coordenadas relativas locales, que aportan unas precisiones tanto en cota como en XY muy buenas, a las coordenadas relativas de los puntos GNSS. Se realiza dicho cambio utilizando dos puntos comunes medidos en ambos sistemas y realizando un desplazamiento y giro desde los puntos medidos con estación total hacia los medidos con GPS. Esos dos puntos comunes sobre el que se realiza el ajuste presentarán un error, puede que varíe la distancia o incluso la cota, pero, en cualquier caso, deben prevalecer los puntos medidos con estación total, ya que son más precisos que los tomados con GNSS, por lo que antes de restaurar la proyección, que se realiza con otro comando de TAO. Previamente, se eliminan los puntos medidos con GNSS y se los de estación total. Como resultado final se obtienen todos nuestros los puntos de control en coordenadas UTM, georreferenciadas con la medición inicial realizada con el sistema GNSS y aportando la precisión local dada por la estación total.

4.4 Técnicas SfM

4.4.1 Metodología SfM

Establecimiento de puntos de control (GCP) y toma de fotografías

Se establecieron y midieron con la estación total TCR705 unos puntos de control o GCP (del inglés *Ground Control Points*) no hizo falta dejarlos fijos en el terreno ya que nos apoyamos en las teselas del mosaico, previo croquis para poder identificar dichos puntos a posteriori.



Figura 4. 5. Tomas de GCP. Mosaico Naeva

Se señaló a un grupo de puntos con dianas adhesivas, con ellas se consiguió fijar con mejor precisión los puntos a tomar con el miniprisma. Figura 4.6.

Existiendo un sistema de coordenadas previo, se proporcionó a la estación total una ubicación exacta, dentro de ese sistema, midiendo dos puntos conocidos, este proceso se conoce como estacionamiento libre, dentro de las configuraciones que proporcionan los equipos topográficos

de Leica. Se tomaron puntos de las esquinas del mosaico, y puntos significativos de algunos peces, figura 4.6, y del brocal del pozo. Con los cuatro puntos de las esquinas del mosaico hubiese sido suficiente para georreferenciar el modelo, pero se tomaron más referencias por tener una comparativa de esos puntos con la medición HDS.

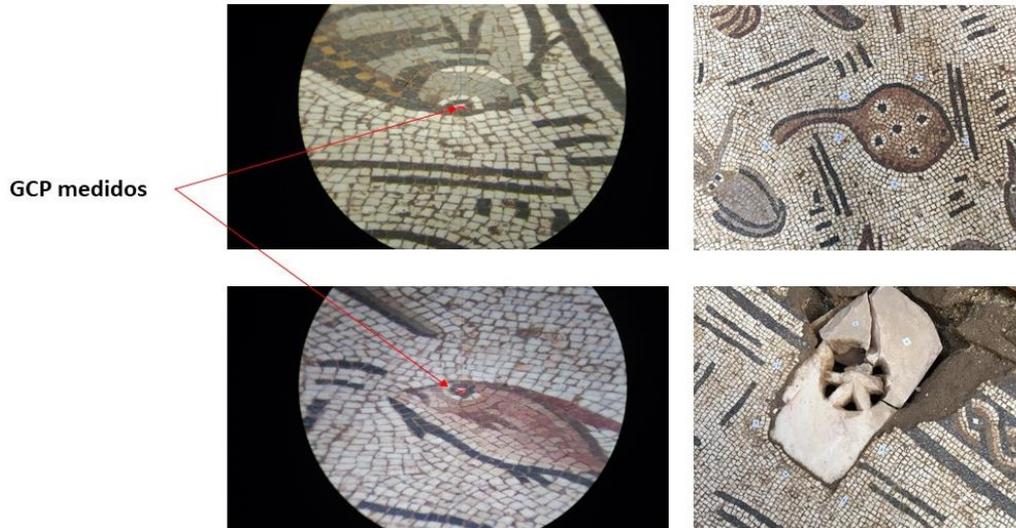


Figura 4.6. GCP en distintas zonas del mosaico



Figura 4.7. GCP con miniprisma

Con estos puntos, previamente ajustados con los georreferenciados con GNSS, se genera un fichero ASCII que posteriormente se usará para georreferenciar el mosaico.

Las condiciones para la toma de datos mediante técnicas SfM en el yacimiento de Cantillana eran excelentes, ya que, por las características del entorno se contaba con luz difusa y, en consecuencia, pocas sombras proyectadas. Así mismo, las características del objeto de estudio, por su textura rugosa y colorido variado hacen que los resultados que se obtengan sean potencialmente de mucha calidad.

Las fotografías se obtuvieron con un solape adecuado, figura 4.9, superior al 80%, y se realizaron desde tierra con una cámara CANON Powershot G3X, distancia focal 8.8mm y tamaño píxel 2.4x2.4 micras, ejecutando un desplazamiento similar al empleado en la programación de un vuelo fotogramétrico, es decir tomas nadirales, figura 4.8, manteniendo el solape necesario, tanto en filas como en columnas.



Figura 4.8. Toma de fotografías. Mosaico Naeva

La secuencia de fotografías debe cumplir un solape mínimo, así como unas condiciones estables en cuanto a la distancia focal y el ajuste del fotómetro para no generar imágenes demasiado oscuras o sobreexpuestas. Figura 4.9.

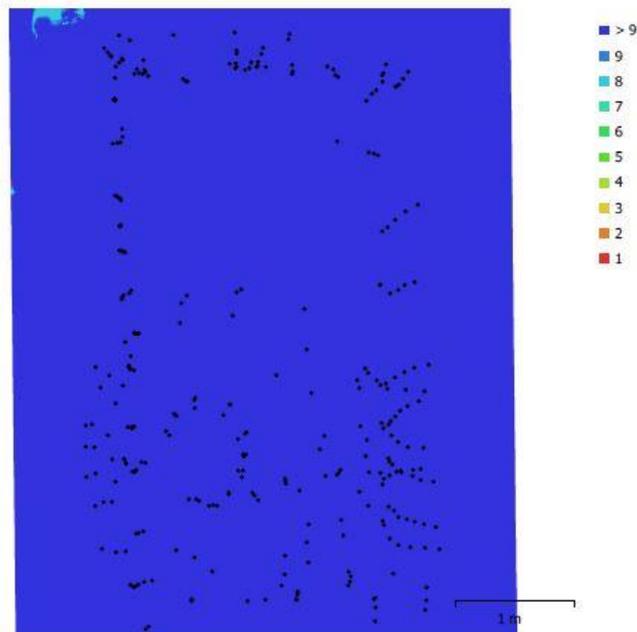


Figura 4.9. Solape de fotografías

Una vez se han tomado todas las fotos se vuelcan al ordenador y se procesan con el programa Agisoft Photoscan, en la actualidad Agisoft Metashape. Para el proceso de datos es necesario contar con un ordenador potente en cuanto a memoria RAM y tarjeta gráfica. Se obtuvieron un total de 305 fotos en unos 30 minutos, se necesitó un tiempo de procesado de unas 14 horas,

de las cuales solo el 15% requirieron dedicación por parte del técnico, el resto del proceso se realizó de forma automática por el citado software.

Procesado de imágenes, técnica SfM

Siguiendo las pautas ya comentadas en los capítulos 2 y 3, se realizan los procesos que establece el software Agisoft Metashape, basado en un conjunto de algoritmos automáticos, como se refleja en el siguiente diagrama de flujo. Figura 4.10.

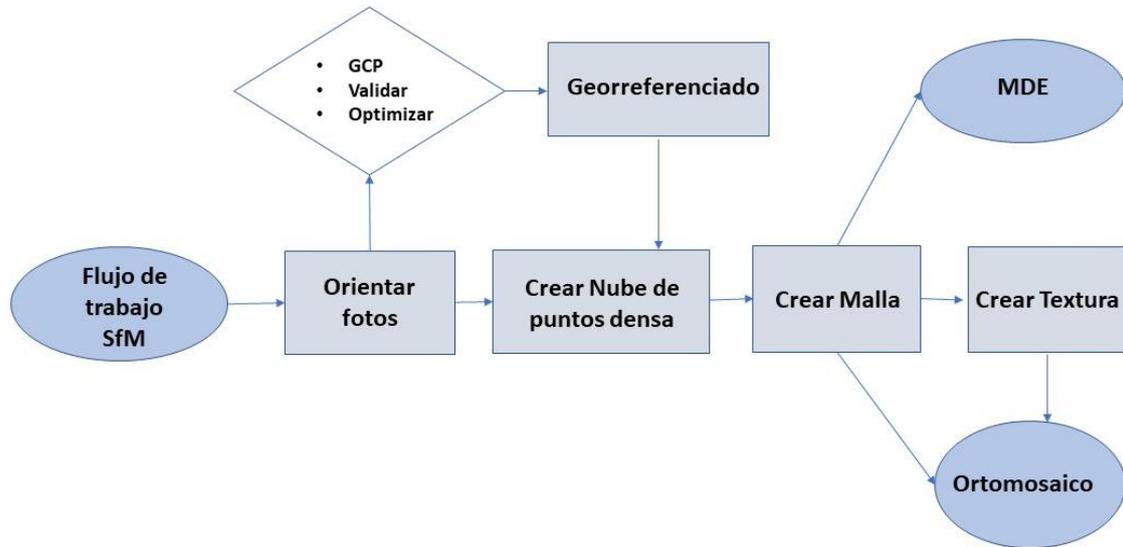


Figura 4.10. Flujo de trabajo en metodología SfM

Se procede a la orientación de las 305 fotografías a calidad alta, todas ellas quedan orientadas. Este procedimiento es uno de los más importantes, ya que se detectan los puntos clave. Este proceso se denomina ajuste Bundle. Con este ajuste se consigue colocar espacialmente una serie de puntos coincidentes de las fotos y la posición de sus cámaras. Figura 4.11.

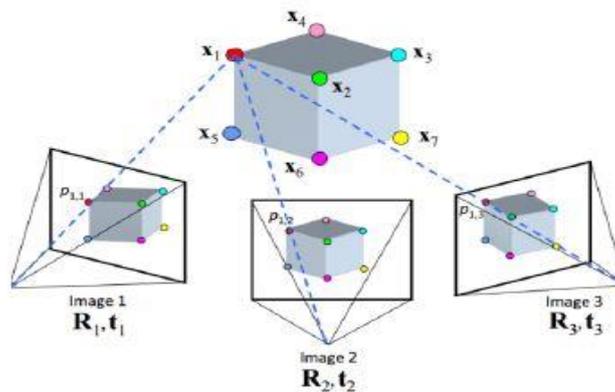


Figura 4.11. Ajuste Bundle. Fuente: New York University, 2016

Se obtienen 2.488.954 puntos, en la nube de puntos dispersa, esta cantidad se verá reducida, ya que en la figura 4.12 se puede observar que hay muchas zonas que no son de interés, por ello se procede a eliminar partes no pertenecientes al mosaico.

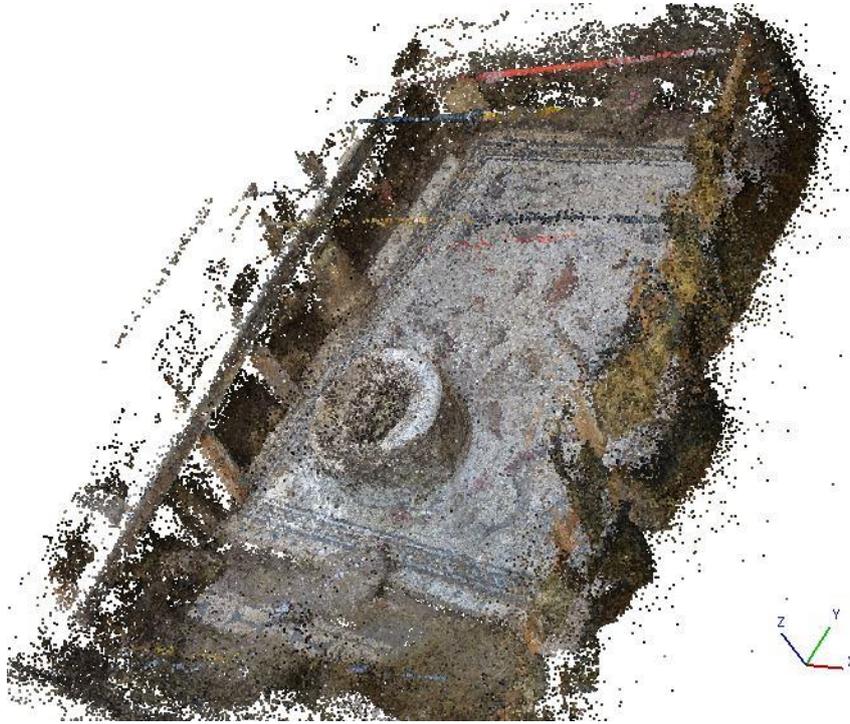


Figura 4.12. Nube dispersa. Mosaico Naeva

Si la obtención del modelo no requiere una georreferenciación, ubicación y métrica precisa, se pasaría directamente a procesar la nube de puntos densa. En el caso de estudio resulta imprescindible ajustar la escala, la orientación y la georreferenciación, por lo que se utilizan los GCP medidos en el mosaico para asignarle a este unas coordenadas reales.

Se ubican tres de los quince puntos tomados en fotografías que sean visibles que estén separados y no alineados. Seguidamente se importa el fichero ASCII con los 15 GCP, se validan cada uno de ellos en todas las fotografías y por último se procede a la optimización, que es reajustar cada coordenada proporcionada inicialmente con las incorporadas a través de los GCP, con ello se disminuye el error medio, llegando a obtener 0.0018m de media.

En la figura 4.13 se observa la posición de los GCP y el error estimado, el color indica el error en Z y el tamaño de la elipse el error en XY.

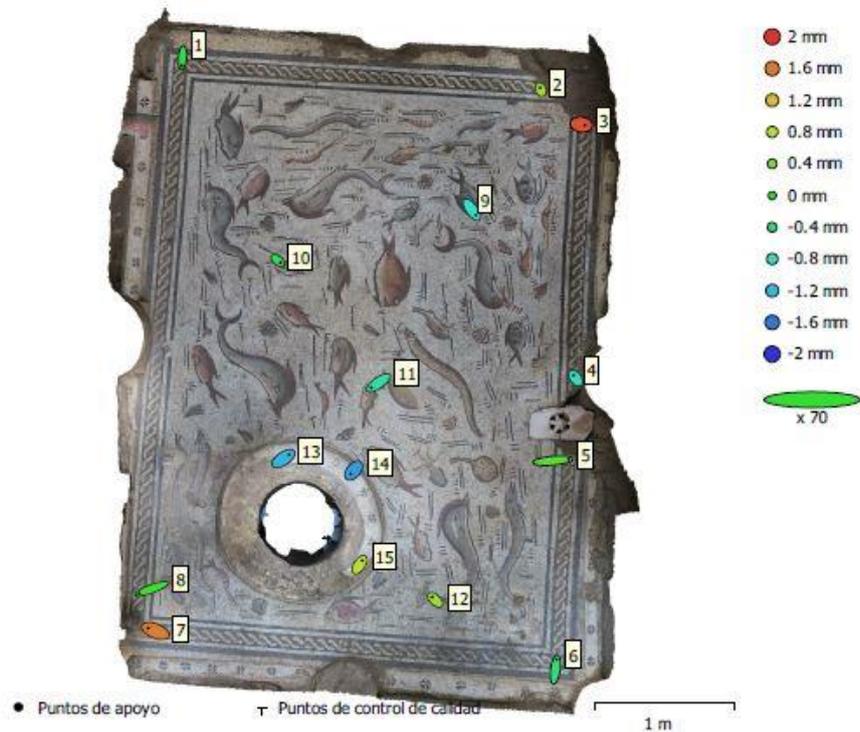


Figura 4.13. Errores en GCP

En la tabla 4.1 se observan los errores cometidos en cada uno de los GCP y el error medio total. El ajuste queda con un error medio por debajo de los 2 mm.

Tabla 4.1. Errores de los GCP en el Mosaico Naeva

Punto	Error en X (mm)	Error en Y (mm)	Error en Z (mm)	Total (mm)
1	-0.138	-1.627	-0.129	1.638
2	-0.127	0.256	0.634	0.738
3	0.706	-0.104	1.821	1.956
4	-0.408	0.576	-0.829	1.088
5	3.224	0.287	0.235	3.245
6	0.278	2.026	-0.415	2.086
7	-1.434	0.572	1.563	2.197
8	-2.570	-0.946	0.106	2.740
9	0.829	-1.153	-0.900	1.681
10	0.556	-0.439	-0.235	0.746
11	-1.448	-1.020	-0.687	1.899
12	-0.582	0.570	0.618	1.022
13	1.165	0.779	-1.237	1.869
14	-0.612	-0.719	-1.374	1.667
15	0.554	0.852	0.818	1.304
Error Medio Total	1.299	0.940	0.928	1.852

El siguiente proceso es la creación de la nube de puntos densa, que se genera a calidad media con nivel de filtrado leve, al no existir sobre la superficie de interés elementos que generen ruido (vegetación u otros elementos ajenos al objeto a representar) y se obtienen (después de proceder al recorte de toda la zona de no interés) 8.246.650 puntos. Figura 4.14.



Figura 4.14. Nube de puntos densa. Mosaico Naeva

Como se indica en el flujo de trabajo de la figura 4.10 se podría haber generado la nube de puntos densa sin tener que realizar una georreferenciación por lo que se obtendría una nube de puntos sin ningún tipo de orientación. No obstante, se podría imponer una escala métrica al objeto o zona que se quiere representar y con ello dotar al modelo de medidas reales. Figura 4.15. En este caso la medida viene reflejada por tener esos dos puntos de coordenadas buenas, pero si no se tuviesen se podría imponer que la distancia entre el punto 1 y 2 es de 2.82 metros, porque así se midió en el mosaico, mediante técnicas de medición directa.

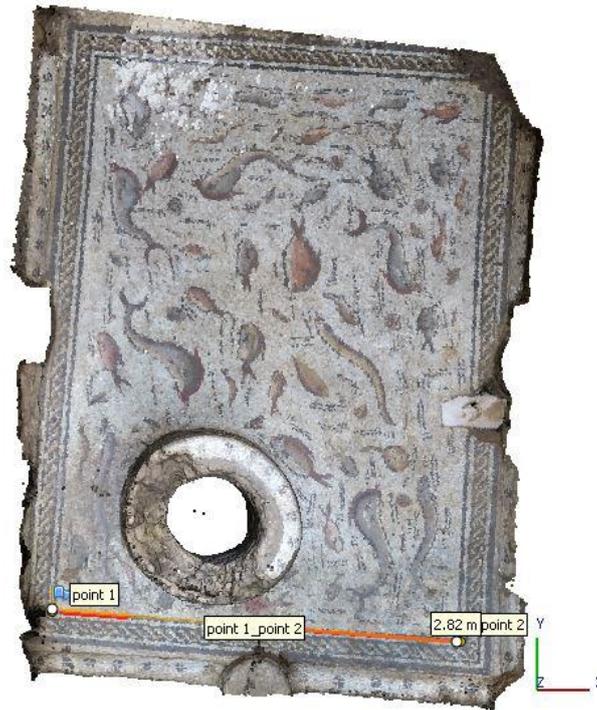


Figura 4.15. Imposición de medidas al objeto. Mosaico Naeva

El procesado de la malla se realiza eligiendo el algoritmo, en cuanto a tipo de superficie, arbitrario. La toma de fotografías se realizó sobre una proyección vertical, en cuanto al suelo del mosaico, imitando el vuelo de un dron, pero al tener el brocal del pozo, se completó con la toma de datos alrededor de este. Se realizaron de forma circular, desplazando la cámara alrededor del brocal del pozo a distintas alturas. Por este motivo se eligió el modelo arbitrario para que este tipo de algoritmo calcule tanto la toma de proyecciones verticales y horizontales y con ello el resultado sea el ideal. La interpolación se habilitó y se obtuvieron 421.343 caras con 212.495 vértices. Figura 4.16.

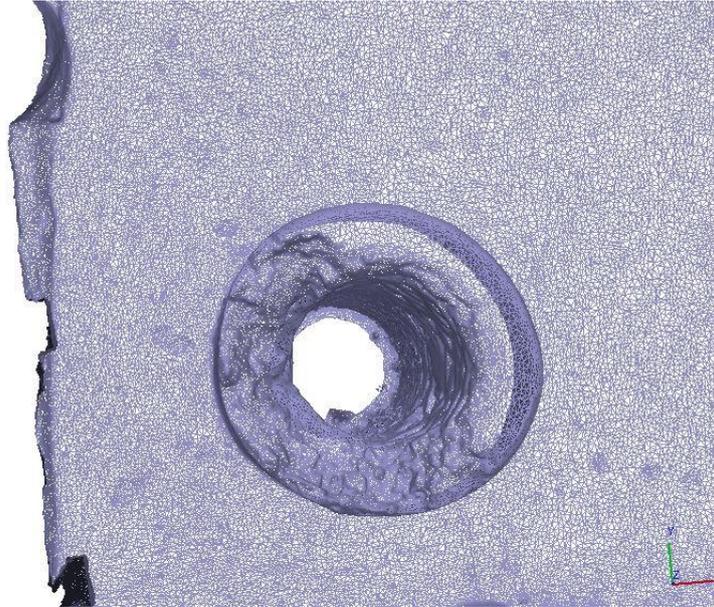


Figura 4.16. Malla de alambre. Mosaico Naeva

Llegados a este punto, se puede afirmar que se ha obtenido un modelo 3D. La textura se realiza con modo de mapeado genérico y modo de mezcla, mosaico. Con este proceso se consigue asignar el color de los píxeles al modelo 3D obtenido. Figura 4.17. No haría falta generar la textura para poder obtener un ortomosaico o el modelo digital de elevaciones (MDE).



Figura 4.17. Modelo con textura. Mosaico Navea

4.4.2 Resultados: Modelo Digital de Elevaciones y Ortomosaico

Ya se ha comentado y representado en el diagrama de flujo de la figura 4.10 que para realizar un modelo digital de elevaciones (MDE) o un ortomosaico del modelo no era necesario crear la textura, con la información de la malla es suficiente para generar tanto un MDE como un ortomosaico.

La generación del MDE se realizó desde la proyección ortogonal, a partir de la nube de puntos densa y con la interpolación habilitada. La resolución que se obtiene es de 0.00157 m (1.57 mm/pix) y con un tamaño de píxel de 2724 x 3522 m. Figura 4.18.

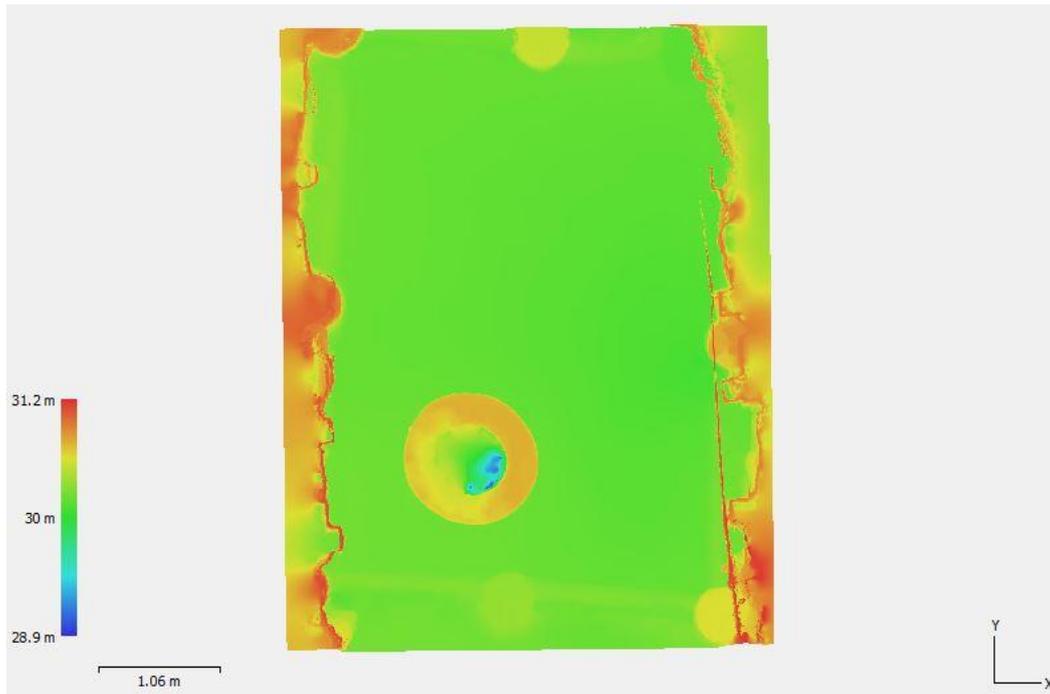


Figura 4.18. MDE. Mosaico Naeva

Partiendo del MDE se calculan las curvas de nivel, que confirma un claro diseño de pendientes para llevar el agua al sumidero. Esta información resultó especialmente útil para el equipo de restauración al que se le encargó trasladar el mosaico a una ubicación más adecuada para su conservación y estudio, ya que les permitió construir una base con el mismo relieve de su asentamiento original. La cota mínima existente es de 28.92 m y la máxima de 31.16 m, se realizan las curvas de nivel a equidistancia de 0.01 m. Figura 4.19.

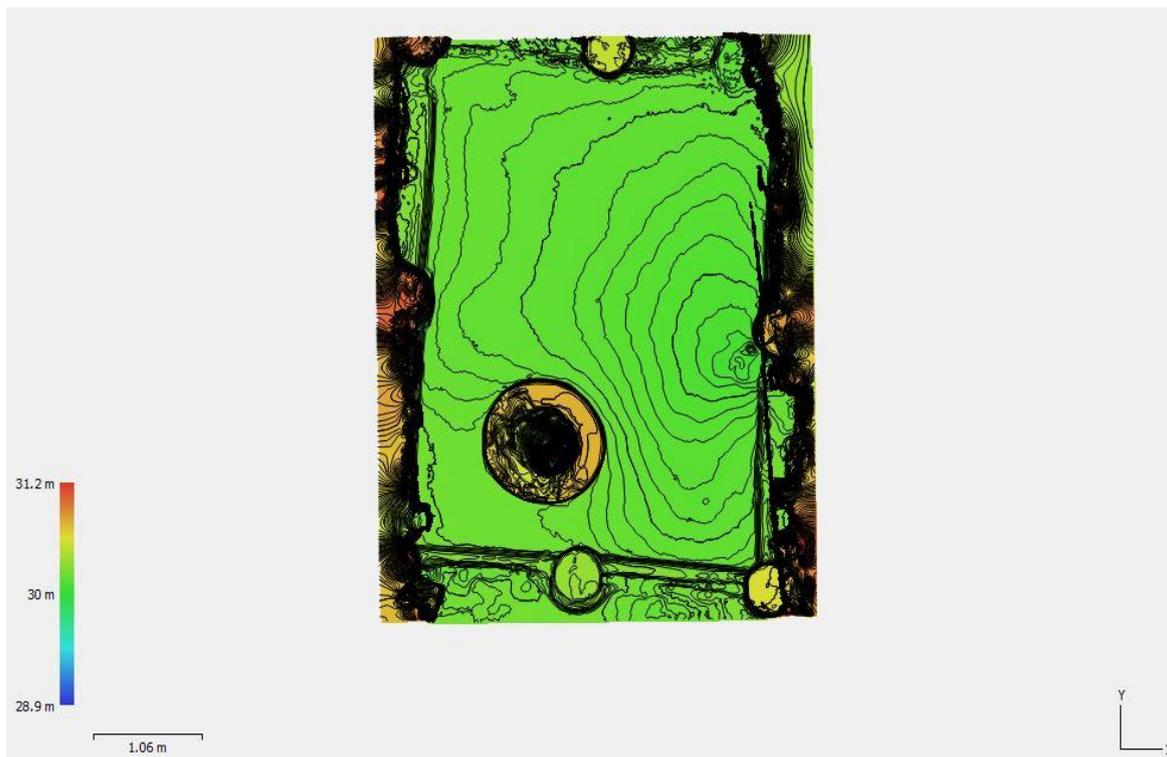


Figura 4.19. Curvas de nivel a 0.01m en sombreado de relieve. Mosaico Naeva

El ortomosaico se realiza en proyección ortogonal con modo de mezcla en mosaico, con tamaño de píxel de 0.0004 m (9688 x 12931, 0.392 mm/pix). Figura 4.20.



Figura 4.20. Ortomosaico. Mosaico Naeva

Enlace para visualizar ortomosaico en 3D realizando giros arbitrarios:

<https://sketchfab.com/3d-models/mosaico-terramar-o-de-los-delfines-9d38178adae4403384f938cf25cbc51c>

4.5 Técnicas HDS

4.5.1 Metodología HDS

Con la metodología HDS se pretende conseguir información 3D del mosaico anteriormente estudiado con la técnica SfM. El objetivo del HDS es conseguir información de cada uno de los puntos que componen un objeto y, con dicha información, estando georreferenciado, reconstruir el objeto o lugar escaneado. Esta metodología presenta una serie de problemas en relación con la precisión, uno debido al equipo que se use en el escaneo y otros externos al equipo como la superficie del objeto, es decir el material que lo conforma o el ángulo de incidencia del láser.

Los escáneres laser utilizan distintas tecnologías en cuanto a su funcionamiento. Los hay que procesan en función del tiempo de vuelo, es decir miden el tiempo que tarda el rayo láser que emiten en ir desde el escáner hasta el objeto y volver, también denominados de pulsos. Otros funcionan por diferencia de fase, lo que implica que tienen una señal base, periódica, que se modifica en función del objeto en el que incida, la diferencia modular existente entre la fase emitida y la recibida es la que sirve para determinar que distancia recorre el láser. Los últimos avances tecnológicos en HDS, se han permitido desarrollar una técnica llamada *Wave Form Digitization (WFD)*, que se basa en mezclar la tecnología de medición por pulso y la de diferencia de fase.

Los láseres con tecnología WFD realizan la emisión de multitud de pulsos para registrar un único punto, de todos los registros de ese único punto eliminan aquellos cuya señal sea muy distinta a la mayoría, se suman las señales que son óptimas, con ello se consigue el punto medido. Figura 4.21. Ejemplo de escáner de tiempo de vuelo sería un C10 y basado en tecnología WFD sería un P20, ambos de la marca Leica Geosystems. En el presente estudio se utilizará un P20 con precisión lineal +/- 1mm y precisión angular, vertical y horizontal 8'', este equipo es capaz de capturar entre 50000 y 1000000 de puntos por segundo.

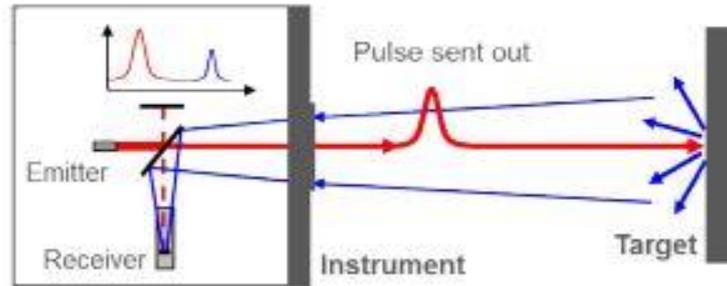


Figura 4.21. Esquema del método WFD. Fuente Leica Geosystems

Establecimiento de puntos de control (CP) y escaneos

Teniendo establecido un sistema de coordenadas en la zona, se realizó, con la estación total TCR705, un estacionamiento libre, con los dos puntos en operaciones previas descritas anteriormente. A partir de ahí se midieron cuatro dianas, GZT21, figura 4.23, instaladas en sus correspondientes soportes magnéticos, estas sirvieron para georreferencia todos los escaneos realizados.

Se tuvieron que establecer dos posiciones con el escáner P20, dentro del mosaico, ya que todo el dispositivo de la zona relacionado con los puntales y sujeciones de estructuras para mantener el mosaico lo mejor posible dificultaba la colocación de este. Figura 4.22.



Figura 4.22. Posiciones del escáner P20

También se realizó un tercer escaneo desde la parte alta, es decir a ras del suelo de la calle, para tener un registro desde arriba, aunque a posteriori se tuviese que despreciar todo el ruido que provocasen los útiles de apuntalamiento de la zona. En la figura 4.23 se aprecia la ubicación de

los tres escaneos o estaciones y el de las cuatro dianas utilizadas para ajustar todos los escaneos del levantamiento en una nube de puntos integrada.

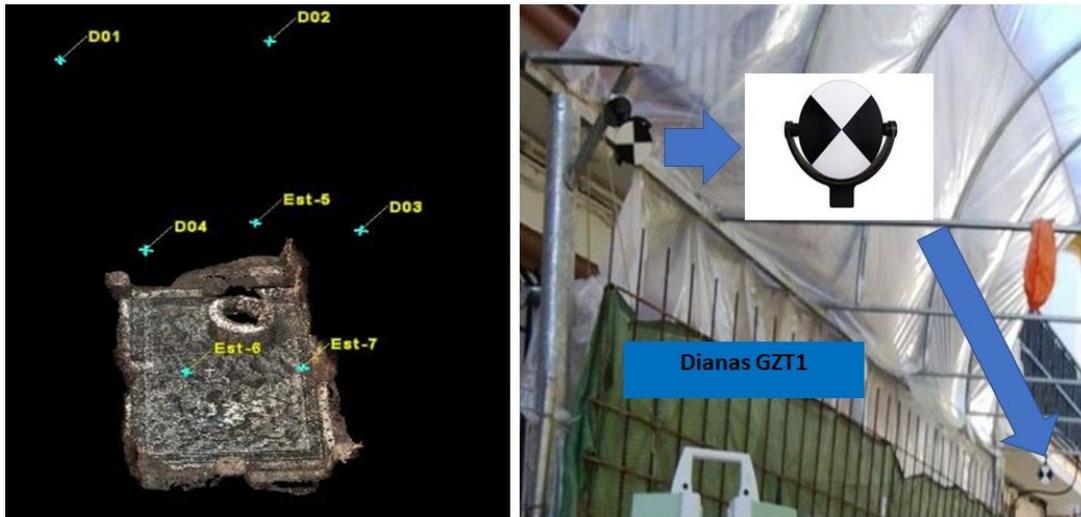


Figura 4.23. Esquema de estacionamiento del escáner y posición de dianas

Para comenzar un trabajo de escaneo se deben cumplir una serie de condiciones dependiendo del trabajo a realizar. Se asignan unos parámetros al proyecto en cuanto a calidad, resolución y modo de escaneado. Se programó un campo de vista a bóveda completa, en vez de realizar una captura de la zona de interés, con el objetivo de capturar no solo la zona de interés, sino también todo el entorno. En modo de escaneado se designó escaneado e imagen, figura 4.24 A, con ello se escanea y se toman fotografías con la cámara que incorpora el P20, lo que permite asignar color a los puntos. La resolución se programa capturar puntos a un paso de 3mm a 10 m, imagen 4.24 B. Las imágenes se toman de forma automática, figura 4.24 C.

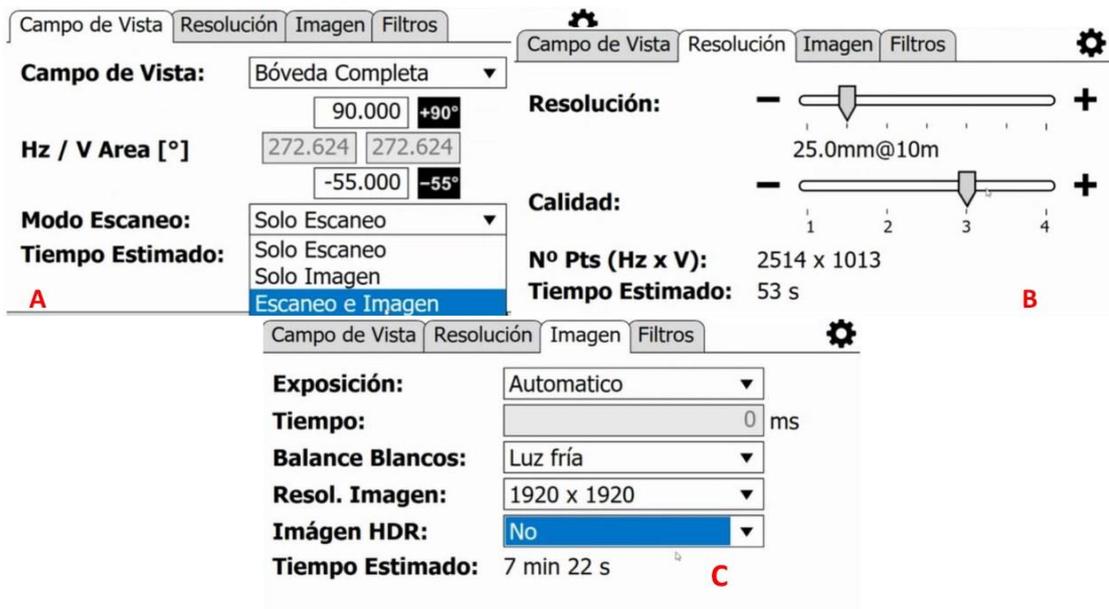


Figura 4.24. Característica de escaneo

El proceso de escaneo debe estar acompañado por la medición de las cuatro dianas que se colocaron en la zona del mosaico, figura 4.23., con ello el escáner toma la posición de esos puntos que fueron medidos con estación total.

Se repite el proceso de escaneo de dianas cada vez que se cambie de posición el escáner, lo que permite enlazar las distintas nubes de puntos generadas. En este proyecto se efectuaron 3 estacionamientos, figura 4.23, Est-5, Est-6, Est-7.

El tiempo de escaneado se define en función de las características que se hayan designado, comunes para las tres posiciones.

Procesado de datos. Cyclone

Una vez terminada la captura de puntos se pasa al trabajo de gabinete, para el cual es necesario un ordenador con un programa instalado que permita gestionar la información captada por el escáner (Leica Cyclone). Las nubes de puntos captadas por los tres escaneos realizados se transfieren, a través de un pen drive USB, directamente del escáner P20 y con él se traslada al ordenador.

Se obtienen tantas carpetas como estaciones, se almacenan en un fichero denominado "project.prj" que debe de estar siempre con las carpetas de escaneo. Este fichero es el que relaciona las carpetas entre sí y, por lo tanto, debe de estar siempre junto a ellas. En cada una de las carpetas se encuentra una carpeta con las imágenes tomadas, otra con el conjunto de puntos escaneados y tantas carpetas como dianas se hayan medido desde esta posición del escáner.

En esa carpeta que se ha creado se incorpora el fichero ASCII con los puntos medidos con estación total a las cuatro dianas.

Se procede a abrir el programa Cyclone de Leica, se crea un proyecto nuevo y se importan los datos descargados del escáner. El proceso de importar es quizás lo que tarda más tiempo, teniendo en cuenta que se mostrará una nube de puntos densa.

Seguidamente se importa al proyecto creado el fichero ASCII con las coordenadas de las dianas de control, para que la información de las mismas esté disponible para el espacio de trabajo cuando se importen las nubes de puntos de cada escaneo.

Se procede a realizar un registro nuevo en el proyecto creado, se le llama "unión". En él se realizarán las uniones de todos los escaneos y el de las dianas. Existe un comando en Cyclone que permite agrupar todos los escaneos, esa unión se realiza indicando que el fichero de dianas es el principal ya que tiene la información necesaria para georreferenciar el conjunto al completo. Es importante que las dianas medidas en cada escaneo tengan el mismo nombre que se le ha asignado a las que contiene el fichero ASCII.

Cuando se ha emparejado cada escaneo con la información de la carpeta de las dianas, se procede a realizar un registro y así se produce la unión de todos los escaneos. Cyclone proporciona los valores correspondientes a los errores cometidos en el ajuste, una vez realizada

la unión. Por último, se crearía el nuevo *scanwork*, para poder visualizar el nuevo *modelspace*, aún hay que unificar esa nube de puntos nueva para que todo quede en el mismo registro.

4.5.2 Resultados: Nube de puntos

El resultado del escaneado con el P20 de Leica es la nube de puntos representada en la figura 4.25, con un total de 99.821 puntos. Cada uno de ellos adquiere las propiedades de RGB que le proporciona el conjunto de fotos que se tomaron cuando se terminó el escaneado a bóveda completa.

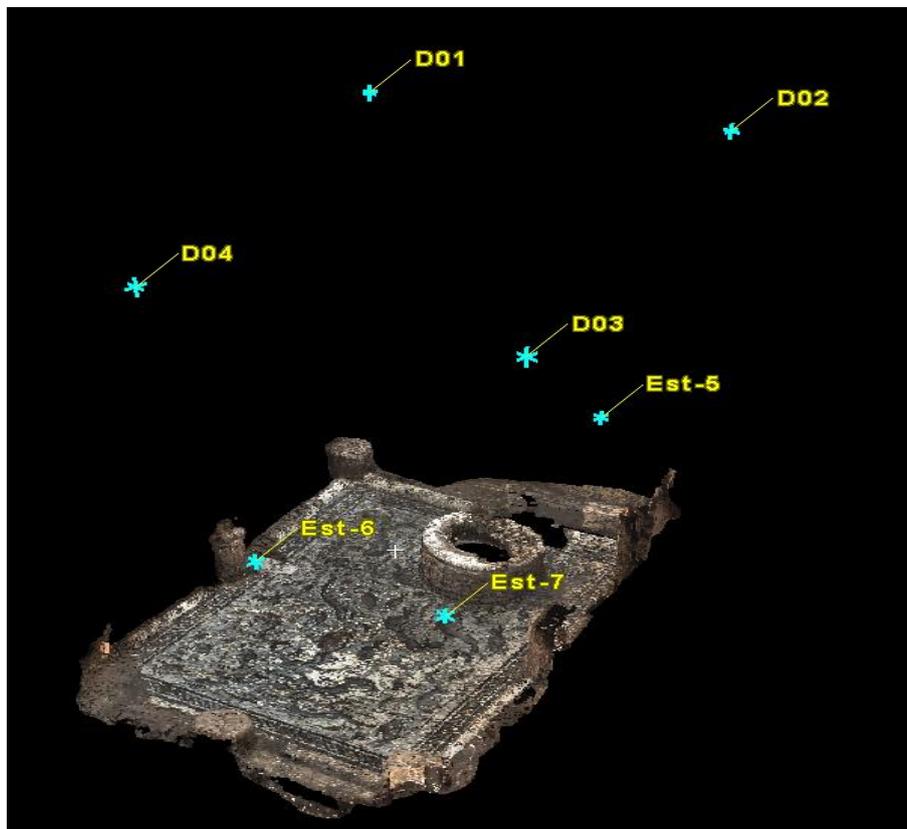


Figura 4.25. Nube de puntos generada con HDS

4.6 Comparativa SfM y HDS

La principal diferencia entre ambas técnicas es el resultado obtenido al realizar cada uno de los procesos explicados en los apartados anteriores y que se reflejan en el diagrama ya expuesto en la figura 4.3. Es decir, con SfM se ha obtenido una nube de puntos, una malla 3D con textura, un MDE y un ortomosaico. En cambio con HDS se ha obtenido una nube de puntos con propiedades RGB aportadas por las fotografías tomadas con la cámara del escáner una vez se terminó el registro de puntos.

Se realiza una superposición entre el modelo 3D generado por SfM y la nube de puntos obtenida con el escáner láser P20 de Leica, figura 4.26. En ella se observan zonas en las cuales no hay representación de los puntos escaneados por el escáner o, mejor dicho, permanecen ocultos bajo el modelo SfM.

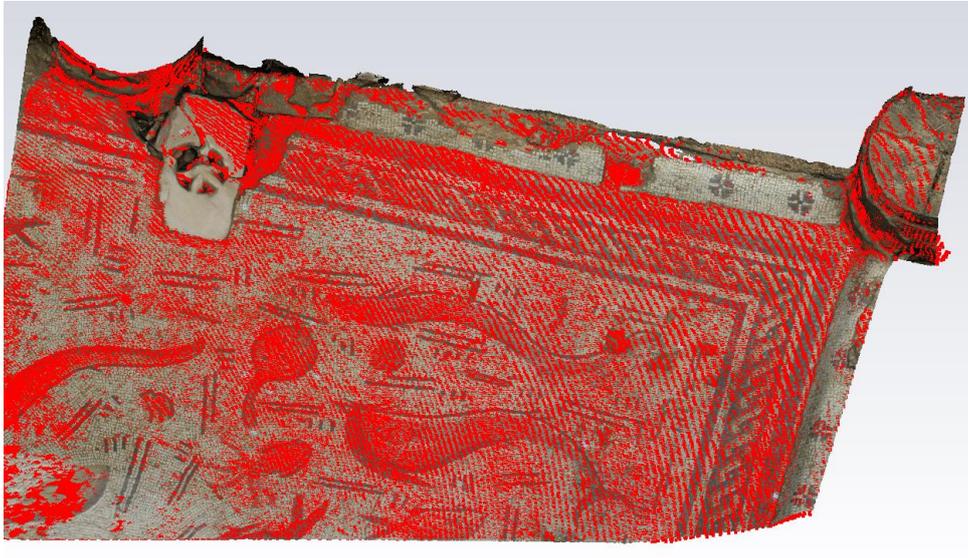


Figura 4.26. Superposición de nube de puntos HDS sobre modelo SfM

En concreto todos los puntos del HDS tomados sobre la superficie de marmol limpio correspondiente al sumidero del mosaico no se muestran sobre el modelo, figura 4.27, situandose debajo de este, al igual que ocurre en la zona del rodapie del mosaico.

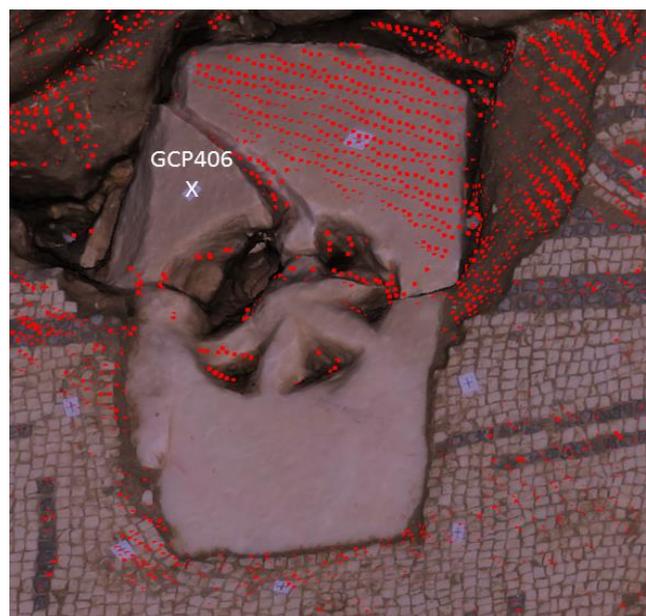


Figura 4.27. Representación de puntos HDS sobre modelo en zona de sumidero

Para confirmar la ubicación de estos puntos basta realizar una vista por debajo del modelo tal como se muestra en la figura 4.28.

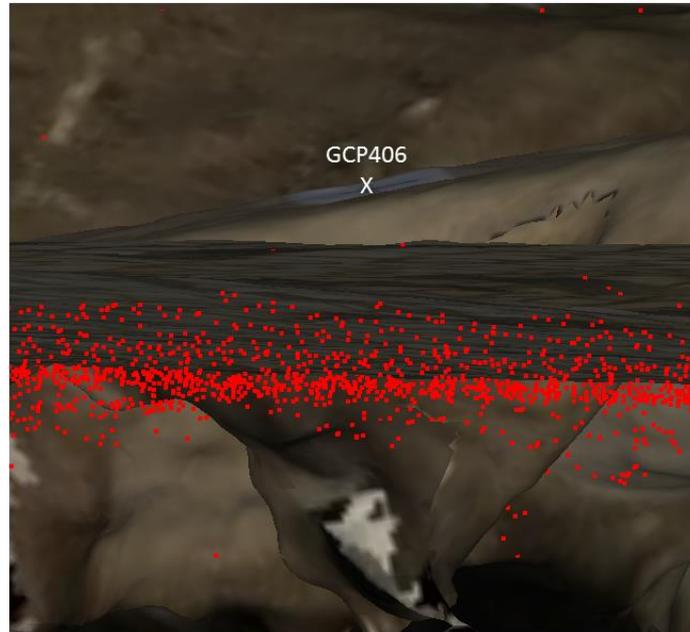


Figura 4.28. Vista de los puntos HDS que quedan por debajo del modelo SfM

Se evidencia que existe una diferencia de cotas en diversas zonas, por lo que se estima necesario realizar una medición de control utilizando un método que no se vea influido por materiales o por disposición geométrica, como así suele ocurrir en mediciones realizadas con HDS. Para ello se recurre a una estación total TCR705, que se utilizó midiendo puntos con la ayuda de un miniprisma, que se sitúa directamente sobre los puntos del terreno. Se tomaron un total de 233 puntos con variedad en ubicación, por su grado de inclinación, y en cuanto al color, por la diferencia entre tonalidades representadas en las teselas del mosaico. Este método ofrece una precisión que se sitúa dentro del rango que proporciona la estación total utilizada, es decir $\pm 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$.

Para no utilizar la totalidad de las nubes de puntos generadas por ambas técnicas, ya que la gran cantidad de datos a manejar hace que el proceso sea lento, se realiza la comparación con un fragmento del mosaico que contiene todos los elementos donde se han encontrado las principales divergencias (sumidero,...). Para obtener el fragmento deseado en HDS, simplemente se recorta la zona de interés de la nube de puntos obtenida del total del mosaico.

Para representar el modelo, o trabajar con la nube de puntos obtenida con SfM, se optó por realizar un nuevo proyecto con un total de 69 fotografías. De los 233 GCP medidos con la estación total, se utilizaron 18 que estaban señalizados con pegatinas, para su rápida y precisa identificación en las fotografías.



Figura 4.29. Fragmento del mosaico con GCP en SfM

Una vez obtenidas ambas muestras a comparar, se realiza el emparejamiento de ambas técnicas contrastadas, con los 233 GCP medidos con estación total y comparando ambas entre sí. Se utiliza el software 3DReshaper, con él se analiza el comportamiento de los puntos entre TCR & SfM, TCR & HDS y HDS & SfM, y poder determinar la precisión de los metodos empleados respecto a los puntos de control tomados con estación total y miniprisma.

4.6.1. Comparativa SfM vs TCR705

En la figura 4.30 se observa la superposición de los GCP sobre el modelo generardo con SfM



Figura 4.30. GCP sobre fragmento del mosaico con técnica SfM

Se realiza un análisis con los GCP y la fotogrametría a través de 3DReshaper y el resultado se aprecia en la figura 4.31.

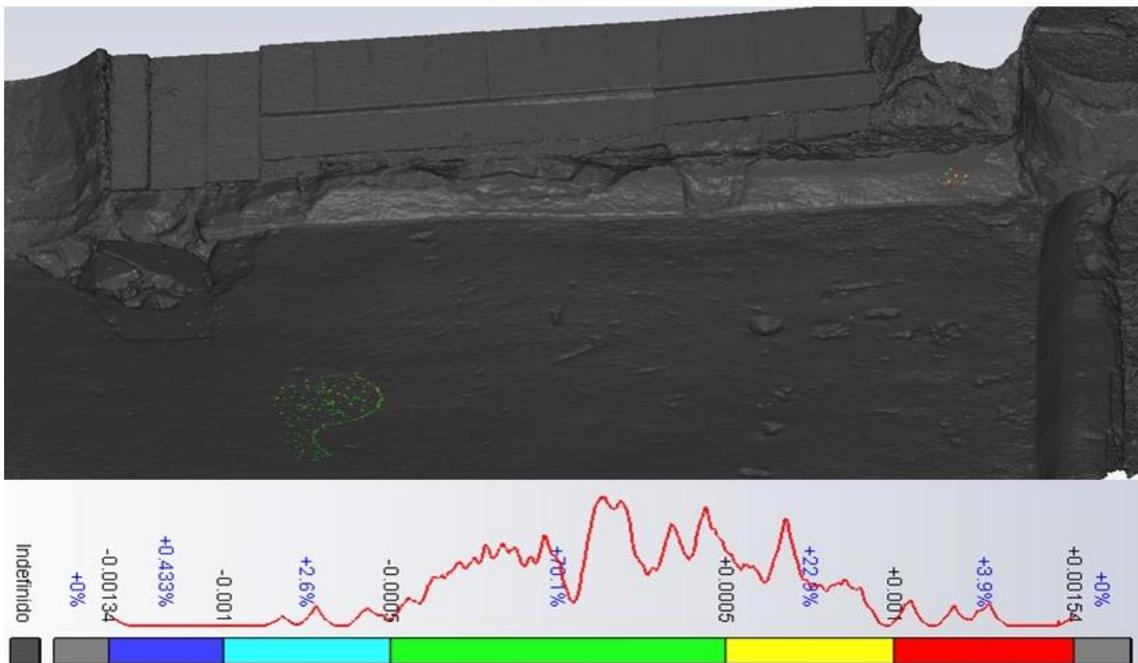


Figura 4.31. Análisis de SfM & GCP en fragmento del mosaico

Es decir:

- 95.6% de los puntos están comprendidos dentro del rango de +/- 1mm. Dentro de este mismo porcentaje, el 70.1% de los puntos se encuentra entre +/- 0.5 mm.

- 4.3% de los puntos exceden el error por encima o por debajo del mm sin llegar en ningún caso a 2 mm de error.

Teniendo en cuenta las características de la estación total utilizada, cuyo rango de error es de $\pm 2\text{mm} + 2\text{ppm}$ en la determinación de coordenadas, se puede concluir que los errores cometidos no han excedido la precisión establecida como modelo, es decir la de la estación total.

4.6.2. Comparativa P20 vs GCP DE TCR705

Al realizar la superposición de los GCP sobre una malla de alta definición, generada a partir de los puntos de HDS, se observan los resultados de la figura 4.32.

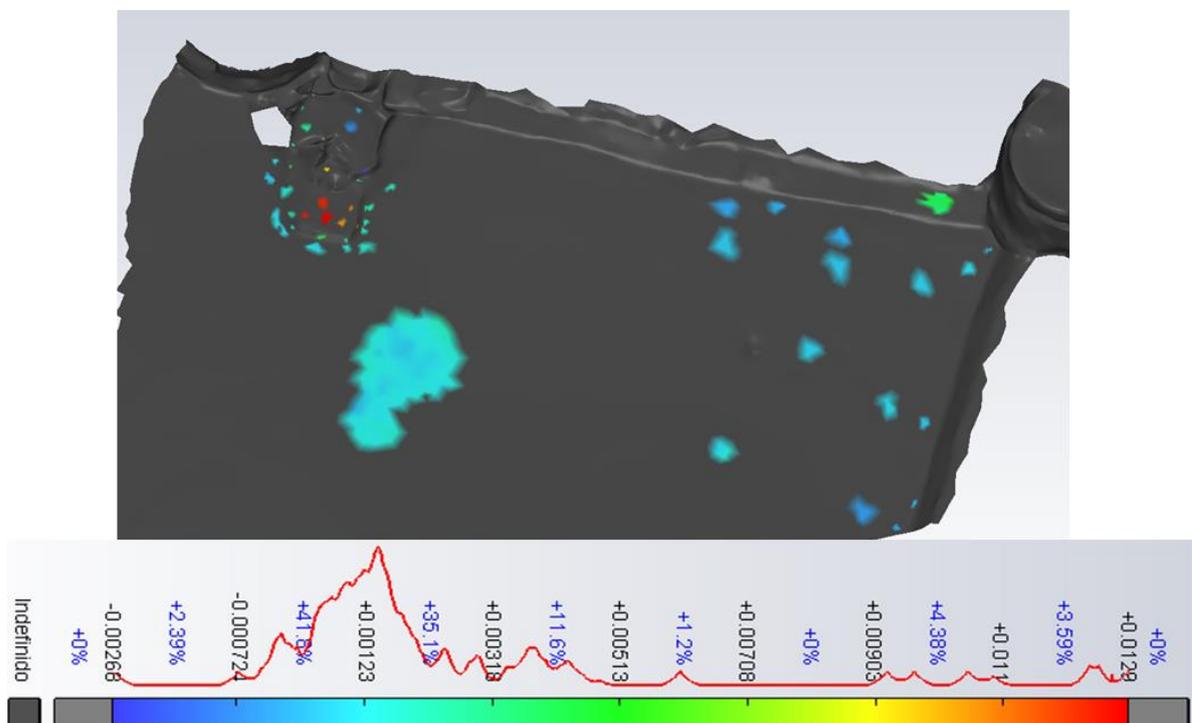


Figura 4.32. Análisis P20 & GCP de TCR705

Es decir:

- 88.5% de los puntos están comprendidos entre los 5 mm y los -0.7 mm
- 2.39% está entre los -0.7 mm y los -2mm.
- 9.17% están comprendidos entre 5 mm y 13 mm, en este tramo es donde percibimos la ubicación de los puntos del sumidero.

Los tonos verdes intensos y rojos son donde se aprecian los errores comprendidos entre los 5 mm y el centímetro y es ahí donde se observan diferencias, primero por el material que compone el sumidero, tonos rojos, y segundo por la proyección de los puntos medidos en el rodapié del mosaico, que presenta un ángulo distinto al resto de puntos, sería la zona verde.

4.6.3. Comparativa P20 vs Modelo SfM

Se procede al igual que en las anteriores comparativas, a través de 3DReshaper se genera el grupo de medición entre la nube del escaneo del P20 y el modelo obtenido con las técnicas SfM y los resultados son los representados en la figura 4.33, contemplando lo siguiente:

- 96.0% de los puntos difieren en un rango de + 3mm. y -5 mm.
- 3.8% de los puntos difieren en un rango de -5 mm y -17 mm. Esta horquilla es significativa porque en ella se encuentran los puntos del sumidero y los medidos sobre el rodapié del mosaico, los cuales tienen un ángulo distinto a los que se encuentra en el suelo del mosaico.
- 0.15% se encontrarían entre + 3mm y 14 mm

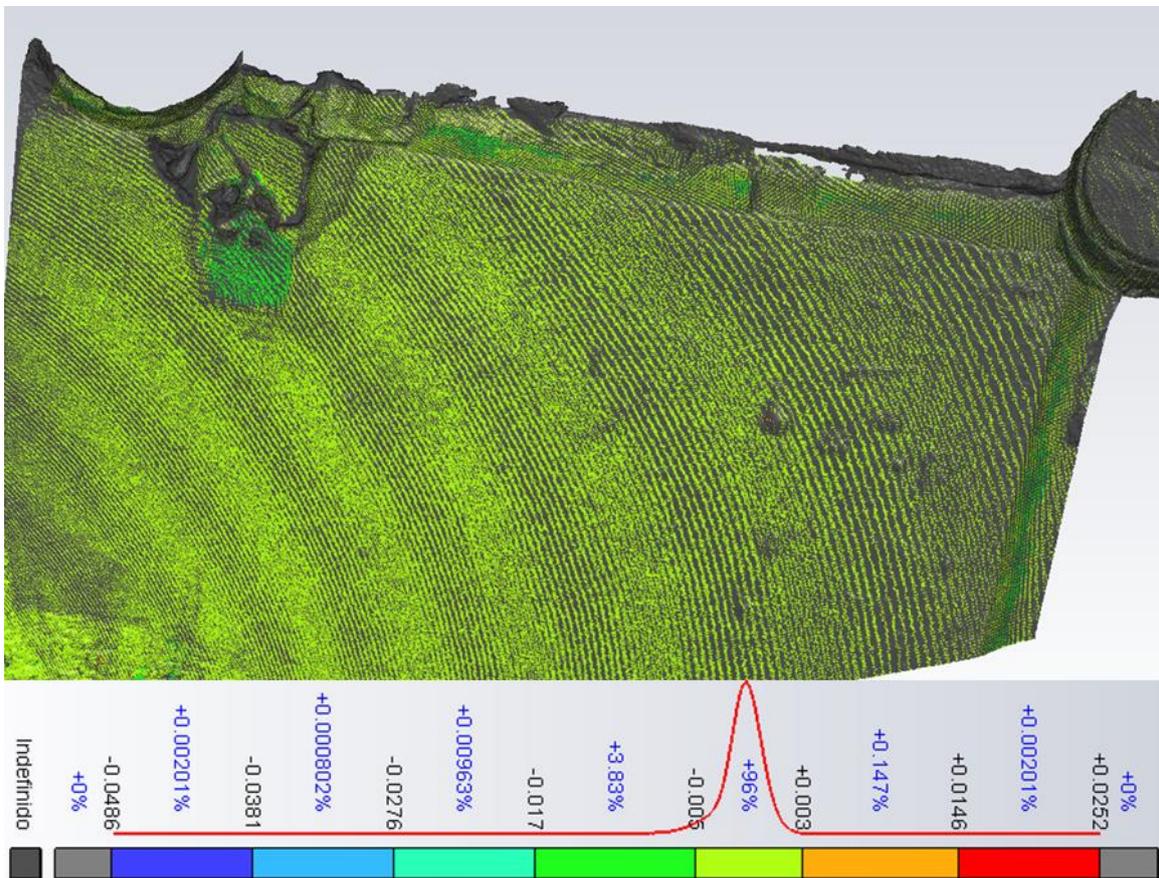


Figura 4.33. Análisis SfM & P20

4.6.4. Conclusiones de las comparativas

Se puede observar que la técnica que se asemeja más, en cuanto a precisión, a la métrica obtenida con los GCP, es la fotogrametría, ya que esta no supera el umbral de precisión, en la mayoría de sus puntos, 95.6%, que proporciona la estación total utilizada, +/- 2mm + 2ppm. No

quiere decir esto que el método HDS no cumpla las expectativas que nos proporcionan los GCP, pero en el rango de los +/- 2 mm el porcentaje de puntos es mayor. Además, se detecta que hay un porcentaje significativo de puntos que superan el umbral de los +/- 2 mm, concretamente un 9.17%, debido a que son puntos tomados sobre la parte limpia del sumidero.

Este aumento en error en dicha zona se debe al material que compone el sumidero, siendo este de mármol. El láser en ciertos materiales, como el mármol, atraviesa en parte la superficie y genera una información errónea en los puntos obtenidos (Lerma et al., 2008). En concreto el mármol, al contar con una capa casi transparente en su superficie, hace que el láser atraviese dicha capa y vuelva a salir, lo que produce una segunda reflexión, generando un error en la posición correcta de los puntos.

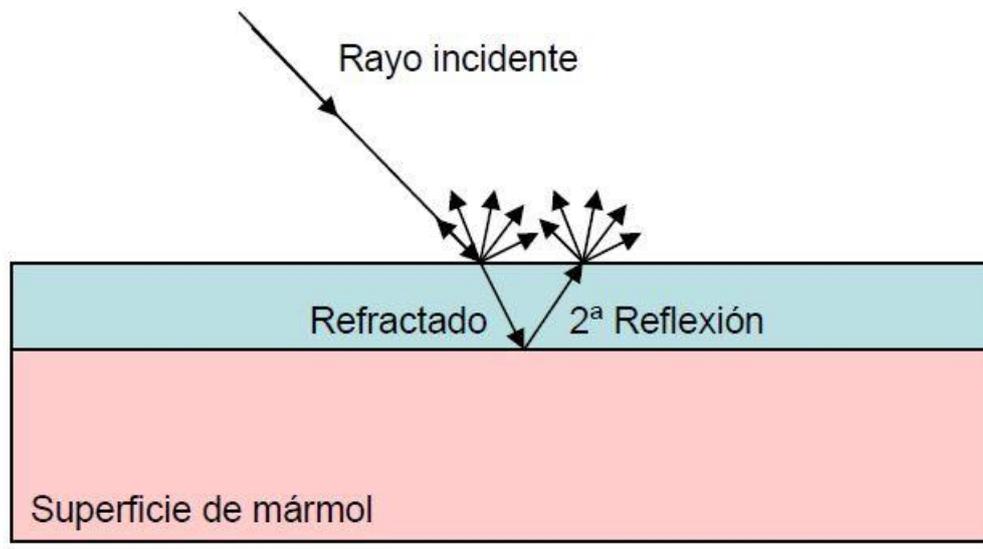


Figura 4.34. Efecto del láser en superficies como el mármol. Fuente: 3DRiskMapping 2008

4.7. Conclusiones

Con las metodologías empleadas en este capítulo y las comparativas realizadas entre ellas, partiendo de que la precisión que nos proporciona las técnicas geodésicas con estación total son las idóneas para proporcionar dicha precisión, se puede concluir que la técnica SfM es la que se acerca más a los valores óptimos generados por la estación total. No quiere decir que HDS no sea una técnica precisa, ya que las valoraciones obtenidas no son desproporcionadas, solo se ha visto influenciadas por las características del mármol. Estos resultados son coherentes con los obtenidos por otros autores, que afirman además que La fotogrametría SfM muestra más operatividad de trabajo en los sitios arqueológicos que el TLS (Peña-Villasenín et al., 2019).

4.8. Referencias

- Brechtken, R., Przybilla, H. J., & Wahl, D. (2008). Visualisation of a Necropolis on the Basis of A Portable Aerial Photogrammetric System and Terrestrial Laser Scanning. ISPRS2008, Beijing, China.
- Boochs, F., Kern, F., Schütze, R., & Marbs, A. (2009). Approaches for geometrical and semantic modelling of huge unstructured 3D point clouds. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2009(1), 65-77.
- Cheng, L., Chen, S., Liu, X., Xu, H., Wu, Y., Li, M., & Chen, Y. (2018). Registration of laser scanning point clouds: A review. *Sensors*, 18(5), 1641.
- den Hartog, K. (2007). Susan Collett: Impluvium. *Ceramics Art and Perception*, (67), 52.
- Fabris, M., Achilli, V., Artese, G., Bragagnolo, D., & Menin, A. (2012). High Resolution Survey of Phaistos Palace (crete) by TIs and Terrestrial Photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, B5.
- Gressin, A., Mallet, C., Demantké, J., & David, N. (2013). Towards 3D lidar point cloud registration improvement using optimal neighborhood knowledge. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 79, 240-251.
- Grussenmeyer, P., Landes, T., Alby, E., & Carozza, L. (2010). High resolution 3D recording and modelling of the Bronze Age cave "Les Fraux" in Périgord (France). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 38, 262-267.
- Kang, D. S., Lee, H. M., Park, H. S., & Lee, I. (2007). Computing method for estimating strain and stress of steel beams using terrestrial laser scanning and FEM. In *Key Engineering Materials* (Vol. 347, pp. 517-522). Trans Tech Publications Ltd.
- Large, A. R., Heritage, G. L., & Charlton, M. E. (2009). 16 Laser Scanning: The Future. *Laser Scanning for the Environmental Sciences*, 262.
- Lerma García, J. L., Van Genechten, B., & Santana Quintero, M. (2008). 3D Risk Mapping. Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning. Training Material Based on Practical Applications.
- Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M., & Villaverde, V. (2010). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37(3), 499-507.
- Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., & Holopainen, M. (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 63-77.
- New York University, C.S.D., 2016. NYU. Courant. Computer Science. Disponible en <http://bit.ly/2bFUZqY>

Peña-Villasenín, S., Gil-Docampo, M., & Ortiz-Sanz, J. (2019). Professional SfM and TLS vs a simple SfM photogrammetry for 3D modelling of rock art and radiance scaling shading in engraving detection. *Journal of Cultural Heritage, 37*, 238-246.

Sear, F. (2020). *Roman architecture*. Routledge.

Weinmann, M., Weinmann, M., Hinz, S., & Jutzi, B. (2011). Fast and automatic image-based registration of TLS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66*(6), S62-S70.

Wells, D., Beck, N., Kleusberg, A., Krakiwsky, E. J., Lachapelle, G., Langley, R. B., & Delikaraoglou, D. (1987). Guide to GPS positioning. In *Canadian GPS Assoc.*

Yang, B., Dong, Z., Liang, F., & Liu, Y. (2016). Automatic registration of large-scale urban scene point clouds based on semantic feature points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 113*, 43-58.

CAPÍTULO 5

APLICACIONES DE LA GEOMÁTICA A LA INGENIERÍA

Assessing the Orange Tree Crown Volumes Using Google Maps as a Low-Cost Photogrammetric Alternative

Índice

CAPITULO 5

5. Abstract	159
5.1. Introduction	159
5.2. Data	162
5.3. Methods	163
5.3.1. Traditional Method (TM)	163
5.3.2. Aerial Photogrammetry (UAV)	166
5.3.3. High Definition Survey (HDS)	168
5.3.4. Proposed Method Using Google Maps (GM)	170
5.3.5. Statistical Analysis	172
5.4. Results	172
5.5. Discussion	177
5.6. Conclusions	179
5.7. References	180

Índice de Figuras

Figura 5. 1. Research trend clusters related to tree crown volume estimation	160
Figura 5. 2. Location of the trials	162
Figura 5. 3. . Location of the trials at the University of Sevilla (Spain)	163
Figura 5. 4. The traditional method for tree crown size assessment	164
Figura 5. 5. Tree crown size measurement by traditional method	165
Figura 5. 6. Results display the traditional method (TM)	166
Figura 5. 7. Unmanned aerial vehicle (UAV) paths	167
Figura 5. 8. Model from UAV: (A) Mesh; (B) Texture	168
Figura 5. 9. High definition survey (HDS) in the trial. (A) HDS Station. (B) Ranging rod and tripods placed on the stakes. (C) Orange Trees	169
Figura 5. 10. Model from HDS. (A) High-density point cloud. (B) Clipped point cloud. (C) Whole tree 2. (D) Tree crown 2	170
Figura 5. 11. Methodology chart for the proposed method using Google Maps (GM)	171
Figura 5. 12. Example of images captured from GM	171
Figura 5. 13. Model from GM. (A) High-density point cloud. (B) Clipped point cloud. (C) Textured model	172
Figura 5. 14. Overlapping of models created with 3DRehaper	173
Figura 5. 15. Visual assessment of the different methods for tree 7. (A) TM vs. tree. (B) UAV vs. TM. (C) HDS vs. TM. (D) GM vs. TM	174
Figura 5. 16. The visual composition of the TM (ellipsoid) and the HDS for tree 7, the red lines mark the cross-sections. (A) Frontal view. (B) Side view (left-right). (C) Top view (with leaves). (D) Top view (contour)	174
Figura 5. 17. Cross-sections at different heights (above sea level) of tree 7 for TM and HDS (contour). (A) Cross-section at 22.4 m. (B) Cross-section at 23 m. (C) Cross section at 23.4 m. (D) Cross-section at 24 m. (E) Cross-section at 24.5 m. (F) Cross-section at 24.7 m.	175
Figura 5. 18. Volume error (m ³) related to absolute tree crown size	176
Figura 5. 19. Research trend evolution to tree crown volume estimation	177
Figura 5. 20. Statistical analysis of the methods used (Bonferroni test)	178

Índice de Tablas

Tabla 5. 1. Traditional method (TM) results _____	165
Tabla 5. 2. Results of the crown volumes (m ³) of the orange trees with each of the methods studied _____	175
Tabla 5. 3. Volume error with respect to the reference method (HDS) _____	176
Tabla 5. 4. Statistical analysis of the 4 methods _____	177

5. Abstract

The accurate assessment of tree crowns is important for agriculture, for example, to adjust spraying rates, to adjust irrigation rates or even to estimate biomass. Among the available methodologies, there are the traditional methods that estimate with a three-dimensional approximation figure, the HDS (High Definition Survey), or TLS (Terrestrial Laser Scanning) based on LiDAR technology, the aerial photogrammetry that has re-emerged with UAVs, as they are considered low cost. There are situations where either the cost or location does not allow for modern methods and prices such as HDS or the use of UAVs. This study proposes, as an alternative methodology, the evaluation of images extracted from Google Maps (GM) for the calculation of tree crown volume. For this purpose, measurements were taken on orange trees in the south of Spain using the four methods mentioned above to evaluate the suitability, accuracy, and limitations of GM. Using the HDS method as a reference, the photogrammetric method with UAV images has shown an average error of 10%, GM has obtained approximately 50%, while the traditional methods, in our case considering ellipsoids, have obtained 100% error. Therefore, the results with GM are encouraging and open new perspectives for the estimation of tree crown volumes at low cost compared to HDS, and without geographical flight restrictions like those of UAVs.

5.1. Introduction

Citrus cultivation is worldwide widespread [1]. Among citrus fruits, the cultivation of the orange tree (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) is considered the most important from a commercial point of view and the Mediterranean climate is especially suitable for its cultivation [2]. All crops are challenged by multiple biotic and abiotic stresses [3], and citrus is no exception [4].

Whitney [5] reported that for orange production, soluble solids and net yields were associated with tree canopy volume. Likewise, for irrigation needs calculation of a crop, the well-known expressions that use crop coefficients in relation to reference evapotranspiration (ET₀) are used [6–8]. Among the factors used in adjusting or modelling ET in crops are the leaf area index or tree volumes [9]. When there are different types of crops or sizes of trees, optimization techniques can be used to make more efficient use of water [10]. As an example, accounting for the variability of tree size within a row in irrigation allows the adjustment of discharge rates to individual tree size, and this could result in significant water savings [11]. Reducing irrigation reduces groundwater contamination by e.g., nitrate leaching [12]. In summary, the volume of the orange tree crown is associated with the production and its quality and it is important for the efficient calculation of the irrigation doses.

On the other hand, the specific information about the leaf volume of the fruit trees is an important factor in determining the doses or spray volumes for the protection of the trees. Studies have shown that the precise dosage of pesticides according to tree shape and foliage volume allows for a saving of 30% [9]. Recent research also supports the need to establish procedures for identifying pesticide doses. For this purpose, especially in “three-dimensional” crops, such as vineyards, olive, and citrus plantations [13], the most appropriate amounts of pesticides can be established with the volume of the crown.

The relevance comes from the fact that pesticide dosing procedures are based on parameters such as leaf wall area or tree row volume, i.e., factors related to the structure of the canopy [14]. Then to ensure that the optimal amount of pesticide should be systematically distributed in all leaf areas, for all crop species and under all conditions it would be necessary to know the tree crown volumes [15]. Therefore, the high level of canopy variability has limited the development of global solutions to ensure the effectiveness of the spraying procedure. In summary, accurate

tree crown profiling is vital for adjustment of spray doses in the agriculture of the future and can be used as an important basis for monitoring tree growth and estimating tree biomass [16].

Worldwide research on tree crown volume, according to the Scopus database, is led by the USA, followed by China, Canada, France, Japan, Germany, Spain, Finland, Italy, and Australia. The 5 institutions that have done the most research in this field are the USDA Forest Service, Beijing Forestry University, Chinese Academy of Sciences, Canadian Forest Service and Sveriges lantbruksuniversitet.

To get an overview of the research carried out in relation to the tree crown volume and its estimation, an analysis has been made on the Scopus database. The specific search query was: (title-abs-key ("tree crown") and title-abs-key (volume) or title-abs-key (estimation)). Apart from the search terms, it was obtained that the main keywords of all these publications were, according to the number of appearances: Forestry, Remote Sensing, Optical Radar, Canopy Architecture, Biomass, Image Analysis, and LiDAR. With all these published works, an analysis of clusters or thematic sets is carried out according to the relationship between them. For this purpose, the Vosviewer software is used, and Figure 1 is obtained where 5 clusters or research trends in this field can be seen

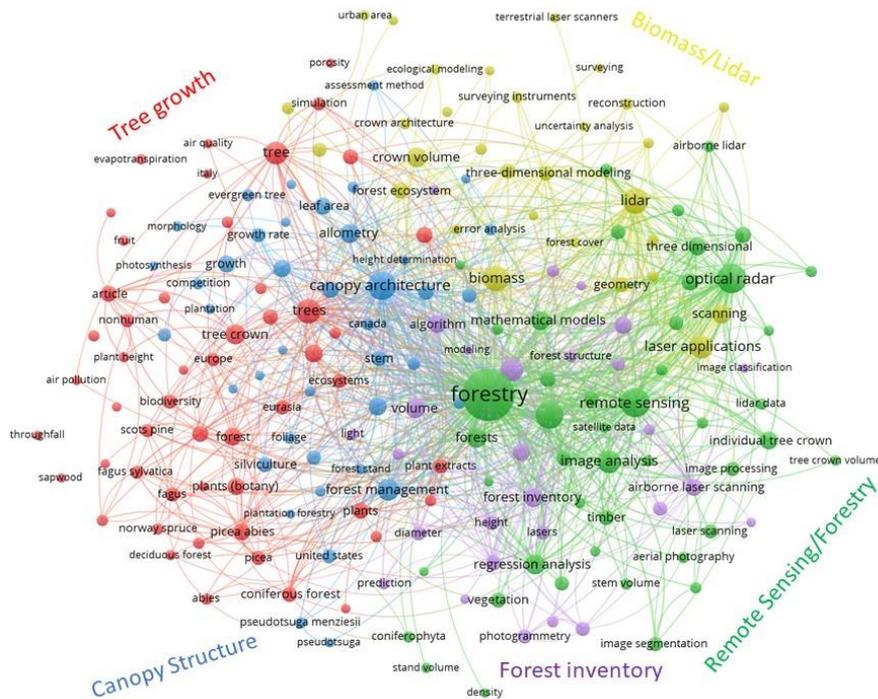


Figura 5.1. Research trend clusters related to tree crown volume estimation

The main cluster, in red, is focused on ecosystems and tree growth. Studies related to the forest inventory with LiDAR [17], or the evapotranspiration of European beech trees (*Fagus sylvatica* L.) [18], stand out. The first studies in relation to evapotranspiration were based on geometric ground-based measurements of tree height, height to crown radii. Crown shapes are modelled as solid geometric shapes based on these measures [19]. This last study was for forestry trees, and although cones are useful for modelling conifers, they conclude that paraboloids are versatile shapes that are adaptable to a wide variety of crowns, in this regard ellipsoids are similar to paraboloids for old-growth tree crowns. The main tree types studied are Pinus [20,21], Picea [22], or Fagus [23], Eucalyptus [24] and Quercus [25,26].

The second cluster, in green, is focused on remote sensing and forestry, as suggested by its main keywords: image analysis [27], Quickbird [28] and airborne lidar data [29]. The third cluster, in blue, is focused on the tree's morphology, where the main keywords are: canopy structure [30,31], forest management [32], deciduous trees [33], allometry, growth, leaf area, and morphology [34]. The fourth cluster, in yellow, is oriented towards biomass and the use of lidar: laser applications, scanning, and geometry data acquisition [35]. Finally, the fifth cluster, in purple, is focused on forest inventory [36]: height, algorithm and diameter.

The manual measurement or traditional method of the crown volume of orange trees is time-consuming and laborious [37], and if it uses many dimensions of these to obtain a better geometry it makes it even more tedious [38]. The traditional methods for assessing tree crown are Vertical Crown Projected Area method (VCPA), Ellipsoid Volume method (VE) and Tree Silhouette Volume method (VTS) [13]. Alternatively, some authors have proposed the use of ultrasonic sensors to measure the volume of the citrus crown due to its easy handling and management and its affordable data processing in real-time [14,39,40].

However, other authors question the accuracy of measurements with this last method [41]. In addition, it has been found that laser technology, LiDAR, achieves higher accuracy compared to ultrasonic sensors [42–44]. These LiDAR techniques have been successfully used on orange plantations even for estimating the harvest and counting oranges [45].

On the other hand, the estimation of the tree crown size is successfully solved by means of aerial photogrammetry, but the cost is too high for orchard trees, such as oranges, when using large airplane flights such as those mentioned above. However, UAV technology makes it possible to quickly capture significant areas of land at a reasonable time and cost [46]. The use of UAVs has led to the widespread use of aerial photogrammetry in many more fields than was previously available. The techniques we are now using are based on the traditional ones, but the requirements, the necessary equipment and the complexity of the tasks have been reduced considerably. Hence, UAV photogrammetry can be understood as a low-cost photogrammetric measurement tool. This has been used in a lot of situations where it was not possible before, such as archaeological sites [47], or in forestry and agriculture [48].

Thus, the acquisition of massive information has been a permanent feature in the history of the world and photogrammetry has played a part in this. Furthermore, with the digital photography associated with the development of image processing and their automation, these techniques have become widely attractive in diverse areas of implementation. Nowadays the use of online information in our environment is in great demand for all kinds of social applications and is increasingly used for research purposes. Given this, cartography platforms such as Google Earth (GE) are widely used to provide a clear overview of areas or buildings [49], elevation data [50], or enhance geo-tourism using augmented reality [51].

Online platforms for global coverage with aerial information about the territory started to be developed with the EarthViewer in 1999 and were extended until the year 2000. On 21 May 2005 Keyhole also a precursor of the KML (Keyhole Markup Language) format [52] was renamed Google Earth (GE). This program was launched on 28 June 2005, having as a main novelty, apart from the change of name and owner, that the program had a free version [53]. This platform also incorporates Google Maps (GM), giving the functionality to Google Earth as a search engine to find streets, avenues or even businesses and expand them in a very readable way. Thus, under the name of Google Earth, the company of the famous search engine has developed a set of tools that combines aerial photographs, maps, three-dimensional images and information, so that it can simulate a zoom of the entire planet and a travelling of any point any other. This platform (GM) introduced a mapping service that was significantly easier and more user-friendly than the market leaders at the time, such as Multimap.com and Streetmap.co.uk in the UK; Mapquest in the USA; and ViaMichelin in Europe.

Today it can be affirmed that GM has greatly increased user expectations and that its widespread popularity has replaced all other applications. In parallel, Google Street View (GSV)

images along user-selected routes can generate environment volumes that can be associated with GM [54]. So, the use of GM is widespread for other types of applications, but especially for two-dimensional uses such as routes or distances [55], or GIS [56]. However, GM's innovative agricultural applications are not yet fully exploited. In the literature, one finds mainly solutions that were developed to get online maps, for example. A case study of developing an online map service to display the locations of hundreds of gardens on the Internet for the United States Department of Agriculture (USDA) [57].

As GM can supply extensive data related to the topography, and land objects of a region due to its undoubted advantages such as wide use, lack of charge and quick update. That is, to generate the geometric properties of the tree crown from the information acquired from several redundant images obtained from GM because with photogrammetric techniques it is possible to generate a three-dimensional model if information from images from different points of view are available. In this study, the aim was to assess its potential use for estimating orange tree crown size, in relation to both traditional and more modern methods mentioned above.

5.2. Data

The trials conducted in this study were performed on orange trees. The situation of the crop was in Seville in the south of Spain, Figure 2. In particular, the trial was in the field of agricultural practices of the University of Seville, 37°21'4.97" N, 5°56'9.82" W, Figure 3. This plot was chosen because it has different crown sizes of orange trees. The 9 trees under study have been marked with a red dot in the zoom of Figure 2.



Figura 5.2. Location of the trials

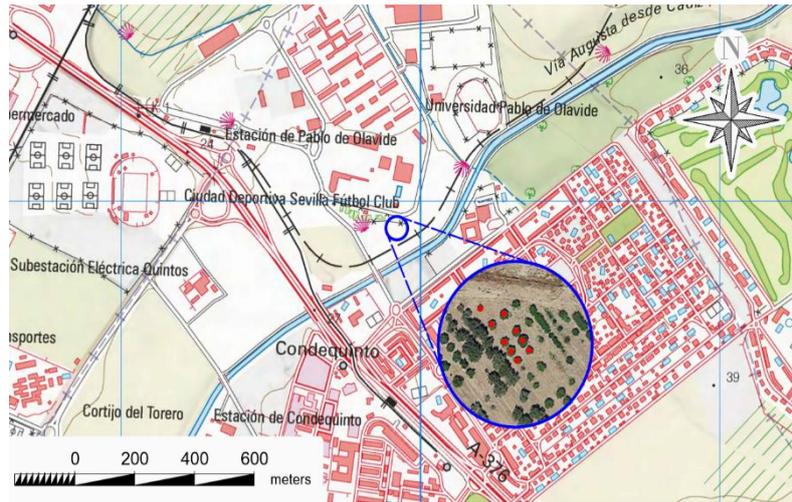


Figura 5.3.. Location of the trials at the University of Sevilla (Spain)

As a control method and to support the different methods used in this study, the coordinates of control points were precisely determined by means of topographic surveying. This was done with the Leica TCR705 total survey station with an accuracy specified for this surveying equipment of 5" (1.5 mgon) angular and 2 mm + 2 ppm linear. A total of 32 points were determined by positioning on known coordinate points. Of these control points, 9 were of high precision because they were measured on stakes and using a clamp tripod in this way plumbing errors are avoided (Figure 6 A). After the targets would be placed also on a clamp tripod for data collection with the scanner. Another 14 points were taken on nails that fixed paper targets in A3 format to the ground and that will serve as ground control points (GCP) also called field support points. The control points are reference points that are physically placed in the environment, in our case were photographed from the air with the flight of the UAV, the criterion is that they are visible and easily identifiable in the aerial photos, so targets are placed on the ground for this purpose, its purpose is to generate a correspondence between the ground coordinates of the centre of projection of the photograph, in analytical photogrammetry is known as coplanarity condition equation, and allow the three-dimensional reconstruction of the object. And finally, 9 points taken in the upper part of the treetops that will serve as support points for the images captured from Google Maps (GM).

The reference system used in this work is the official one in Spain, the ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) which coincides with the WGS84 (World Geodetic System 1984) used by the GPS (Global Positioning System), and the heights are orthometric, i.e., above sea level.

5.3. Methods

5.3.1. Traditional Method (TM)

The traditional method is based on assuming that the tree crown is a regular geometric figure like a spheroid [38], in our case we will adopt an ellipsoid that has been used in orange trees [59] and even other kinds of trees like olive trees [13]. Of course, other manual methods are more precise, but also much more laborious, for example, the one proposed by Zaman Salyani [60], which consists of measuring the 6 diameters and 4 heights, but we estimate that it is too complex and not very useful for our study. The intention is to substitute this method if the proposed one turns out to be favourable.

Our study used the ellipsoid which is a closed curved surface whose three main orthogonal sections are ellipses (Figure 4). Once the three semi-axes have been measured, the volume is immediately calculated, although they will also be integrated into drawing programs for comparison purposes. The volume formula used was that of equation 1. Note that in Figure 3 it seems that the ellipsoid in some parts the branches and the leaves come off the surface, this is because the ellipsoid obtained by the traditional method has been represented on the model obtained by the HDS method.

$$V_e = \frac{4\pi}{3} a_y b_x c_z \quad (1)$$

being V_e the ellipsoid volume, a_x , b_y , c_z are the semi-axes of the ellipsoid.

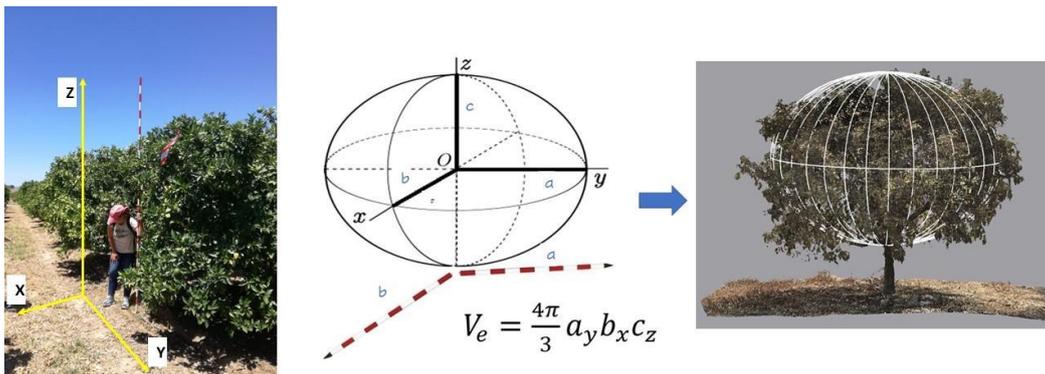


Figura 5.4. The traditional method for tree crown size assessment

In the case of the study, the directions of the axes have been defined according to the direction of the crop lines, Figure 4. The Y-axis is the direction of the crop line, the X-axis is the line perpendicular to the crop line (Figure 5), and the Z-axis is the height of the tree. The measurements were made using a tape measure attached to a ranging rod, so that the points to be measured, especially the height, can be easily reached. Figure 4 shows the measurement in the x-direction.



Figura 5.5. Tree crown size measurement by traditional method

The data obtained by the traditional method are shown in Table 1. A total of one hour was used to obtain these measurements in the plot.

Tabla 5.1. Traditional method (TM) results

Tree	b_x	a_y	c_z	Vol (m ³)
1	1.01	1.07	1.13	5.067
2	1.46	1.81	1.02	11.235
3	1.90	1.95	1.05	16.295
4	1.76	1.81	1.35	18.014
5	1.43	1.50	1.09	9.761
6	1.41	1.46	0.93	7.949
7	2.36	2.20	1.48	32.079
8	1.93	1.77	1.64	23.396
9	1.82	1.77	1.20	16.081

To display the volume, the AutoCAD software was used (Figure 6), where the ellipsoids are displayed in 3D for later comparison with the other methods. The measured semi-axes X and Y of each ellipsoid are incorporated as individual ellipses in each of their corresponding axes. Subsequently, revolutions are made to each ellipsoid, after once the ellipsoid is done, it is scaled with reference to the Z-axis obtained value. Finally, a coordinate change is made for each of the ellipsoids, placing them in their coordinates. The time required in this computer work has been 2 h for the whole process.

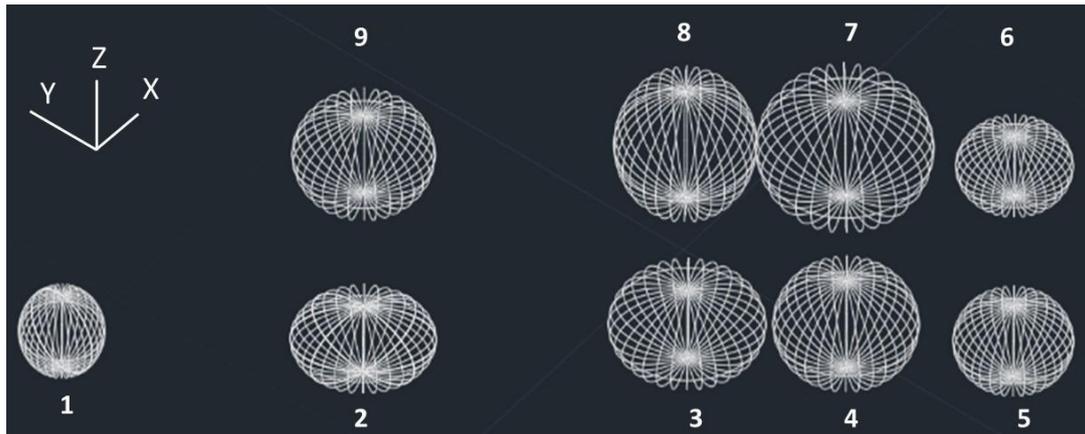


Figura 5. 6. Results display the traditional method (TM)

5.3.2. Aerial Photogrammetry (UAV)

In our study, the photogrammetric method was carried out by means of a UAV flight at a determined and constant height. The UAV was equipped with a camera with which sequential photographs are taken respecting a certain overlap between them and following a programmed route. In this case, a “DJI” UAV, model “Mavic Pro” whose camera sensor is 1/2.3” (CMOS), effective pixels: 12.35 M (total pixels: 12.71 M) has been used. PhotoScan software was used for information processing.

The proposal of more than one flight is conditioned by the distance of the tree plantation frame which forced to fix a higher than usual camera inclination. To ensure that enough information is taken to generate the tree crown models, a multiple flight plan was chosen, since the double grid flights that are usually implemented in flight scheduling applications only allow for one cross grid. A flight plan is made delimiting the zone or work area (Figure 7). Five flight paths were needed to obtain an optimal area, with photographs of all the views of each tree. This is achieved by changing the angle of the camera, and thus the application of the UAV flight calculates the new paths adapted to this new angle. Figure 5 shows the area under study and the flights made. In this way, path 1, Figure 5A, corresponds to the path taken over the working area. It is not possible to obtain the four sides of the volume with pass 1 alone. It is therefore supplemented by four further paths from outside of the covered area due to the camera inclination as can be shown in Figure 7B, where the green area is the field under study, and white lines the flight trajectory, i.e., the path up, down, left, and right with respect to the working area or zone. Passes 2 to 5 are those corresponding to the four sides of the square (Figure 5B).

The flight plan with the UAV for the vertical photographs and being able to obtain an accuracy of 0.66 cm/pixel (GSD or Ground Sample Distance) was 20 m height above ground, 80% overlap between photographs and between flight lines, and all with 2 m/s flight speed. The remaining passes were programmed in the same way, except that the angle of the camera was 45° towards our object of study, the orange trees.



Figura 5. 7. Unmanned aerial vehicle (UAV) paths

The plot to be flown has an area of 600 m². This was covered with a photographic flight with UAV. For the 5-pass flight, the time needed to perform the flight was 30 min and 40 s. A total of 171 images were obtained. This program uses calculation algorithms based on SfM techniques and performs a range of semi-automatic processes. The process was as follows: a dense point cloud was obtained, formed by a total of 2,691,196 points. With the 14 ground control points (GCP) the model was georeferenced. With these data, the software got an average error of 0.0393 m in coordinates with an accuracy of 0.005 m and with an error of 1.41 pixel. One process to take into account, due to its importance in the final result, is the orientation of the images based on the bundle adjustment, which allows the spatial relocation of both a series of coincident points between images and the positions of the cameras that took those images with respect to the scene.

This process was based on the checkpoints initially measured with the total station, those taken on nails in the targets. Another important part is the creation of the mesh (Figure 8A), in which the calculation algorithm must be chosen, depending on the type of element to be modelled. In our case, the type of surface selected was “arbitrary” because it approximates the result much better to the reality of the object. Finally, to obtain a higher resolution of the object, giving it a greater impression of realism and detail, the texture is processed (Figure 8B).

Once the whole process is done, all the images of the trees are clipped individually, leaving only the crown or aerial part of the tree. At the end, the images of the treetops are exported as a file with extension .obj to be able to treat it later and calculate its volume. The time needed for information processing was 24 h, with 95% of that time being used for processing.

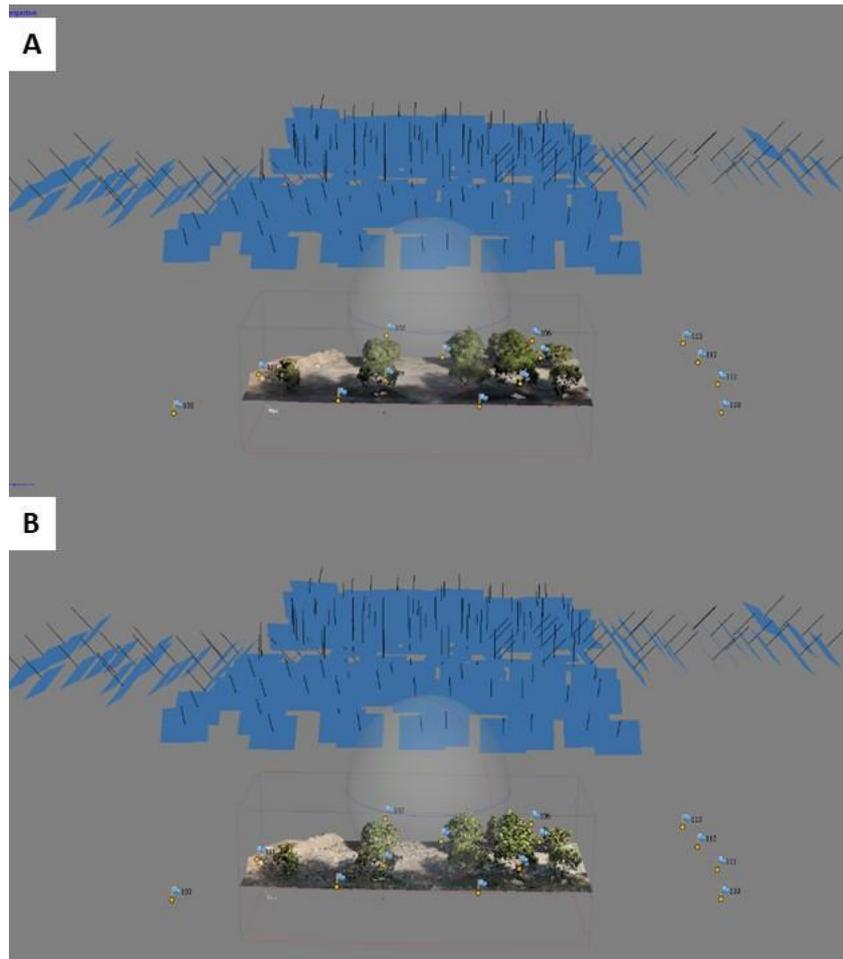


Figura 5. 8. Model from UAV: (A) Mesh; (B) Texture

5.3.3. High Definition Survey (HDS)

Since the introduction of Light Detection and Ranging (LiDAR) technology, through HDS (High Definition Survey) there is now a means to quickly digitize the complex structural details of tree crowns [44]. The method with HDS laser scanners is based on the use of a scanner station able to carry out topographic surveys using the “High-Definition Survey” system. The principle of the scanner station is to emit a laser pulse towards an object that bounces back to the station. In this way the station returns a 3-dimensional point cloud of the scanned area. To scan an object with several faces, it is necessary to make several scans from different positions to remove shadows or hidden faces that may arise.

This system allows the reconstruction of complex tree crown geometries thanks to the high density of measured points. These techniques have also been used to measure the crown of orange trees [3]. In this last work, the comparison with traditional or manual methods is outlined. Two types of tree crown volume estimation inspired by manual or traditional methods were tested. The first, named the cube-fit method which is the most common among Brazilian orange growers, consisted of measuring the volume of a cube that contains the whole tree. The second, named cylinder-fit method, consider the volume of the crown as two-thirds of the volume of a cylinder that contains the tree. The authors themselves state that the dimensions of the cube and the cylinder often produce uncertain measurements due to the difficulty of

visually defining the crown borders. In summary, they concluded that LiDAR-based approaches provided a more accurate crown representation than the current manual methods and should be used as a new standard for crown volume calculations.

In our study a Leica brand scanner, model P20, Figure 9A, with linearity error <math><1\text{ mm}</math> and vertical and horizontal angular accuracy $8''/8''$ ($40\ \mu\text{rad}/40\ \mu\text{rad}$) as accuracy specifications defined by the manufacturer. The targets with their ranging rod and tripods were placed on the stakes visible from the station (Figure 9B). Ten stations with their corresponding scans were made, the total time spent was four hours.



Figura 5. 9. High definition survey (HDS) in the trial. (A) HDS Station. (B) Ranging rod and tripods placed on the stakes. (C) Orange Trees

Once the data has been collected with HDS, it is processed using Leica's software, "Cyclone". Initially, a point cloud is obtained in which the positions of the stations are shown with their reference coordinates and a large point cloud, Figure 10A. Since much more than necessary has been scanned, everything that is not of interest is clipped, resulting in Figure 10B. In Figure 10C, an example of tree number 2 is shown isolated from the rest, and in Figure 10D only the crown of this tree.

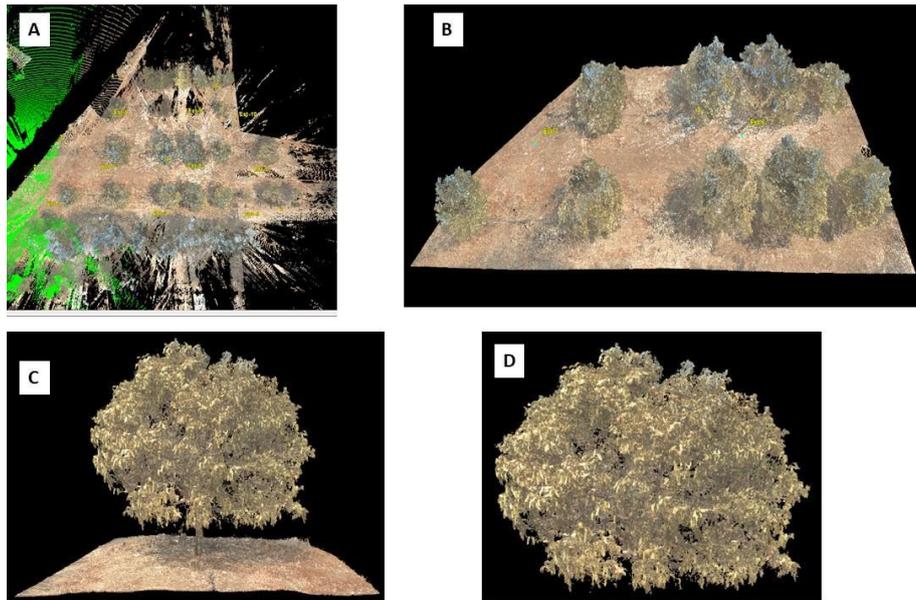


Figura 5. 10. Model from HDS. (A) High-density point cloud. (B) Clipped point cloud. (C) Whole tree 2. (D) Tree crown 2

Each tree is a cloud of points that are exported as a file (.ptx) so that it can be processed later to calculate its volume. This process took 2 h to perform the entire process including data download, area delimitation and trunk clipping. To calculate the volume of the crown, the “CloudCompare” software was used. This generates a 3D model with the point cloud of each of the tree crowns obtained. After going through several processes, such as normal curvature estimation, generation of the new model, a model is obtained that is exported to a file (.ply), finally the volume was obtained with the software “3DReshaper”.

5.3.4. Proposed Method Using Google Maps (GM)

To determine the geometric properties of an object by photogrammetric techniques, such as volume or surface, it is first necessary to obtain the information obtained from several images (usually photographs) from various points of view to reconstruct the geometry. The proposed methodology proposes to replace the aerial photography of UAVs in the field with the use of images extracted from GM. These images are obtained through screenshots of the GM views, as there is no service for downloading views from the GM platform. The concept is to simulate a flight with UAV, so two types of images must be taken (Figure 11), the nadiral image of the zone, and images close to 45 degrees of inclination around the study zone. In this study, 32 images were collected, which were subsequently clipped and saved in an image (.jpg) format file. Figure 12 shows an example of the images acquired at 45° from different points of view. The images obtained from GM had a resolution of 3.96 cm/pixel.

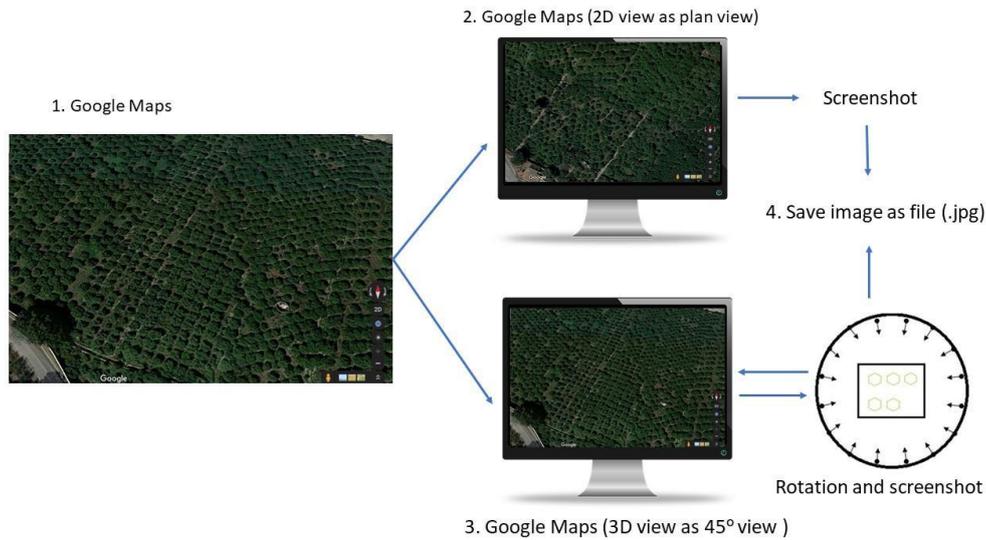


Figura 5. 11. Methodology chart for the proposed method using Google Maps (GM)

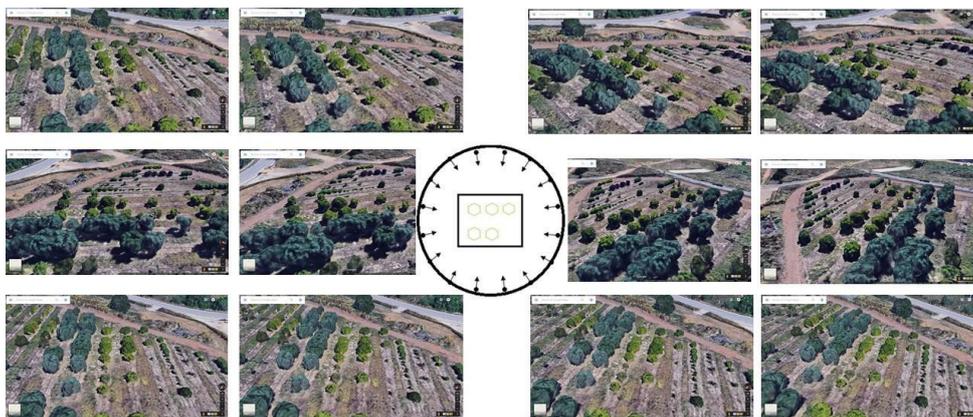


Figura 5. 12. Example of images captured from GM

The Agisoft Photoscan SW, now called Metashape, was used to process the 32 images. This program uses SfM techniques to obtain 3D modelling of the photographed object or area. To generate precise and well-georeferenced models, once all the images are oriented, the control points taken are placed in the treetops so that with them the final model is optimal in terms of its metrics and positioning in space. In terms of time, no more than 15 min are spent due to the low number of photos and control points. In this process, 619,062 points were obtained once the high-density point cloud was generated. Previously, the control points were located and verified on the crown of the trees, generating an error in coordinates of 0.3716 m and an error of 9.398 pixels.

The results obtained with GM are shown in Figure 13, where for the smallest tree no model has been obtained, tree number 1. On the top of the tree crowns are the location of the checkpoints which have helped to give good accuracy and georeferencing to the final model, Figure 12C. This process is the same as the one performed in the UAV method since the same software is used. The only difference is that for GM, 32 images were obtained, as opposed to the 171 obtained in the UAV method, a significantly lower amount, so the processing time did not exceed 15 min. The result is a textured model, Figure 12C, from which the image of each of the trees, except tree number 1, is extracted, the trunks are clipped and thus we have the area of interest formed by a cloud of points, this cloud is exported with .obj extension to calculate its volume. The

software used to generate the 3D mesh from which the volumes are obtained applies a convex envelope algorithm, which removes the inner points of the cloud using only those located on the outer surface.

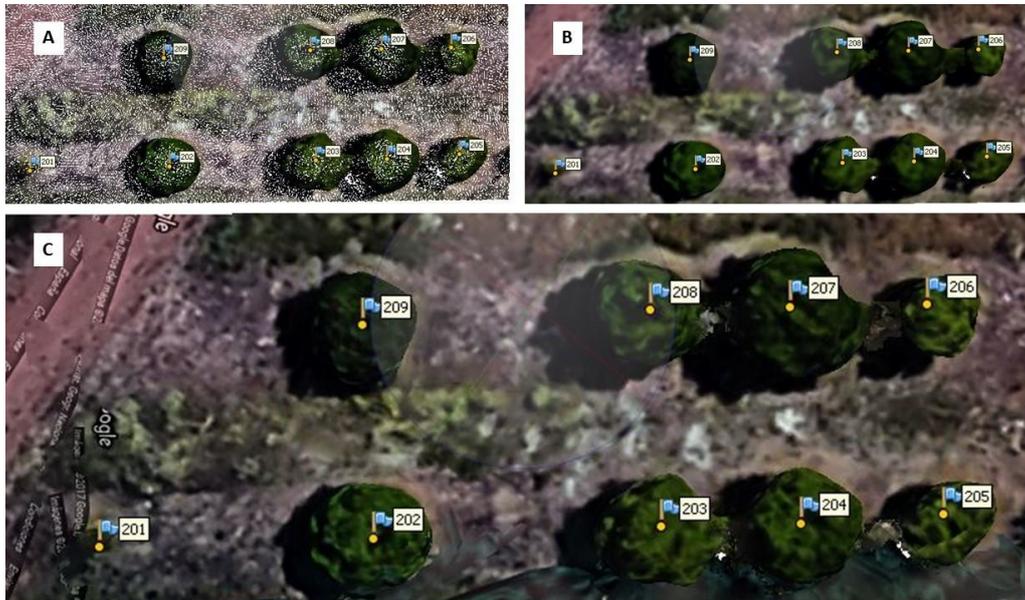


Figura 5. 13. Model from GM. (A) High-density point cloud. (B) Clipped point cloud. (C) Textured model

5.3.5. Statistical Analysis

With the results obtained, a statistical analysis will be performed with the XLSTAT 2019 software. First, the conditions of homoscedasticity and normality will be checked. If it is completed, an ANOVA test will be performed with an interval significance of $p < 0.05$ (5%) and a tolerance of 0.0001. After a Bonferroni test will be performed with $p < 0.05$.

5.4. Results

To unify all the models obtained with the different methods under study and to be able to analyse the results, the “3DReshaper” software was used. This software is capable of processing point clouds and 3D models and calculating the volume of each one. The sensitivity of the volume calculation is not specified by the 3DReshaper manufacturer. As it is a mathematical calculation, the accuracy depends on the number of points that define the outer surface, as it is an irregular surface, the greater the density of points, the better defined the irregular surface of the tree crown will be. The models of the trees obtained by the four methods used were introduced. As the results of the GM method show, it was not possible to detect the small tree. Therefore, a total of 32 models are available for comparative analysis. Figure 14 shows an overlap of these models. A detail of these can be seen in Figure 15 for tree number 7. In Figure 15, the ellipsoid obtained with the traditional method has been maintained in each of the models to make a visual reference.

Table 2 summarizes all the volumes obtained with the “3DReshaper”, where the trees have been sorted by crown size for further error analysis according to tree size. Firstly, it has been observed that the GM method has not been able to detect the smallest tree, so it is not advisable for tree crowns below 5 m^3 .

Secondly, the traditional method offers the highest results, whatever the tree observed compared to the other methods. Note that volumes of treetops have been found to be higher

depending on the method. This is attributed to the geometry of the tree, which may favour one or the other method. In general, the resulting values could be ordered roughly as follows according to the volumes obtained: $TM \gg GM > UAV > HDS$. This suggests that the more accurate the method is, the smaller the volume achieved for the crown of the tree, probably because methods that involve fewer data are more roughly.

The crown of a real tree is an imperfect three-dimensional representation with depressions and projections. On the other hand, the mathematical representation used is that of a perfect ellipsoid, defined by its three semi-axes measured in the field. In Figure 15, by the TM it can be seen how the ellipsoid encompasses the top of the tree, but nevertheless, some branches extend from it, due to the nature of the tree itself. This geometrical figure has proven to be better than the models used by Brazilian orange producers. In this figure, it can be appreciated how there are gaps between the real contour of the tree and the ellipsoid. The problem that arises is that the ellipsoid itself uses these cavities for the calculation of the tree's crown instead of deleting them (Figure 16). In this way, whether the volume of the ellipsoid is greater or lesser, it will always calculate the volume by excess or by default and that is why it will not faithfully represent what is real. To illustrate the issue of excess volume of the TM, the cross-sections have been marked in red in Figure 16, for a front (Figure 16A) and side (Figure 16B) views. Figure 16C shows a top view with the leaves and the TM and Figure 15D show only the contours, which will be used later in the sections of Figure 17. In Figure 17 some of these cross-sections of tree 7 have been represented, where they are compared with the contour of the leaves, determined by the HDS method. Note that the sections are listed with the height above sea level and that the lowest point in the crown of this tree is 22.1 m above sea level. To illustrate a final example of the large approximation involved in the TM, a variation of 10 cm in one of the measurements of the tree 7, e.g., the measurement of the tree height, results in a variation of 10% i.e., 3 m^3 . Figure 18 illustrates the results obtained in Table 3 as a function of the absolute volume of the tree. Figure 18 also shows the trend lines of the methods.

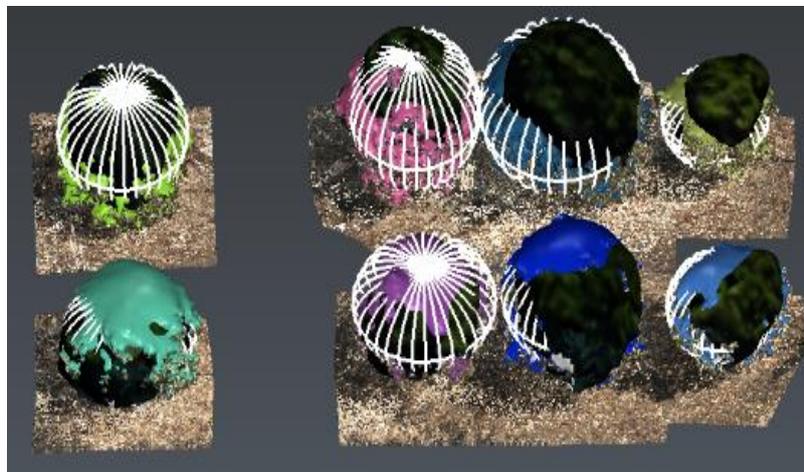


Figura 5. 14. Overlapping of models created with 3DRehaper

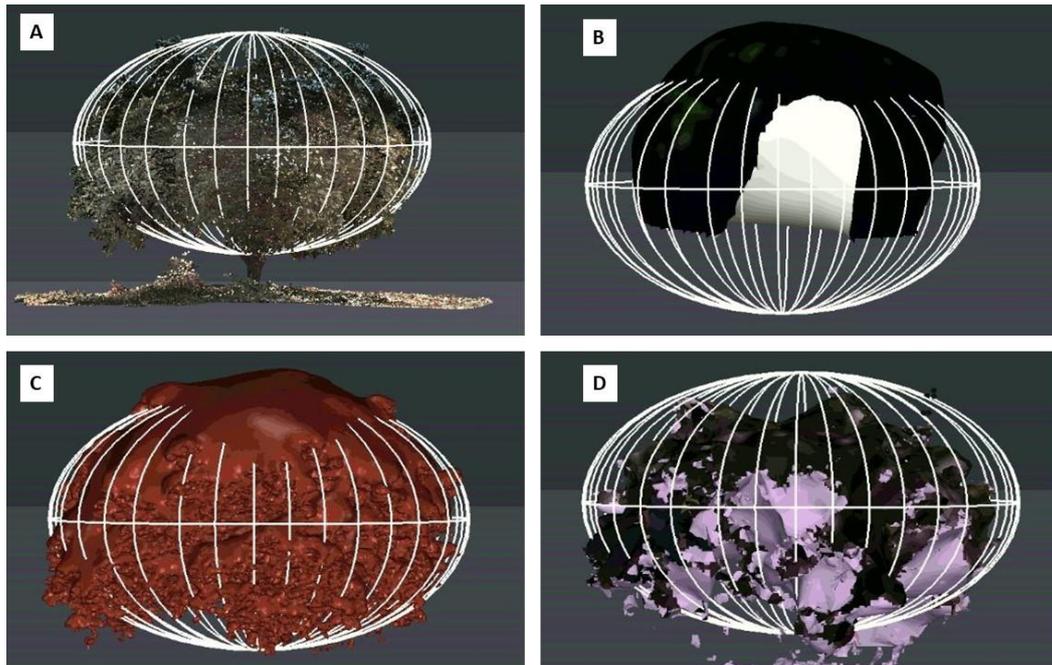


Figura 5. 15. Visual assessment of the different methods for tree 7. (A) TM vs. tree. (B) UAV vs. TM. (C) HDS vs. TM. (D) GM vs. TM

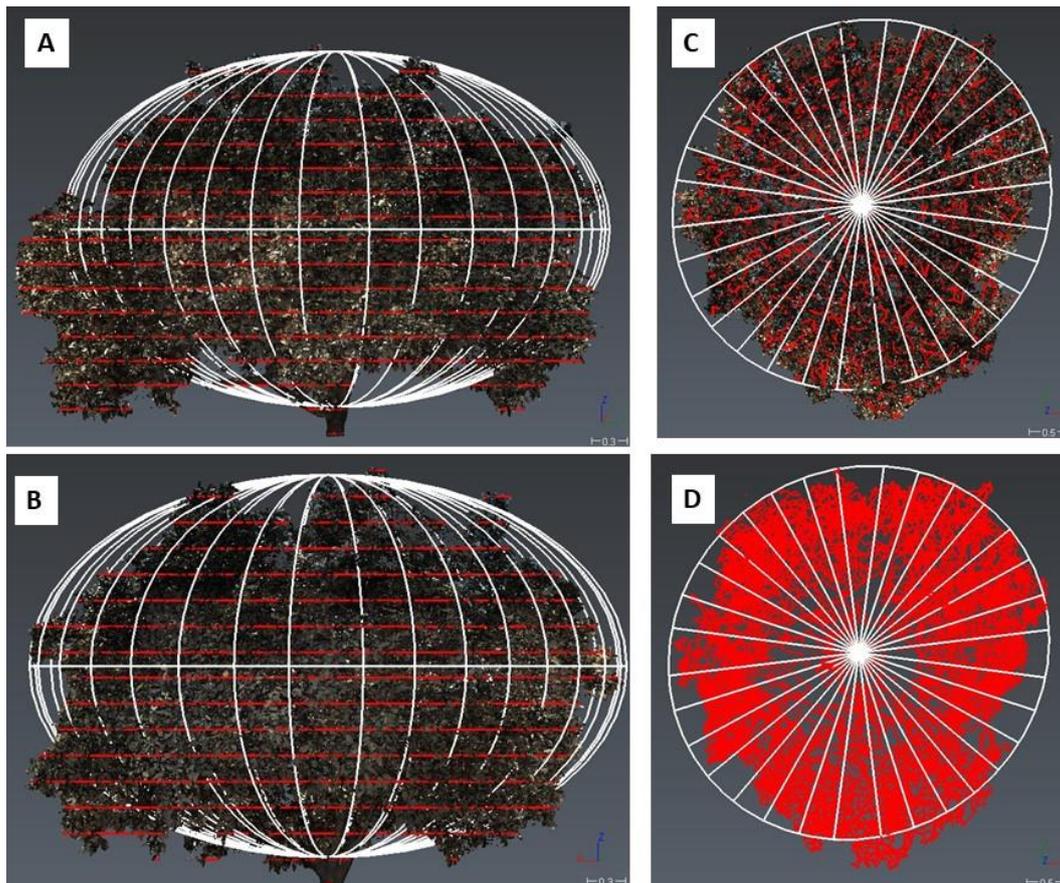


Figura 5. 16. The visual composition of the TM (ellipsoid) and the HDS for tree 7, the red lines mark the cross-sections. (A) Frontal view. (B) Side view (left-right). (C) Top view (with leaves). (D) Top view (contour)

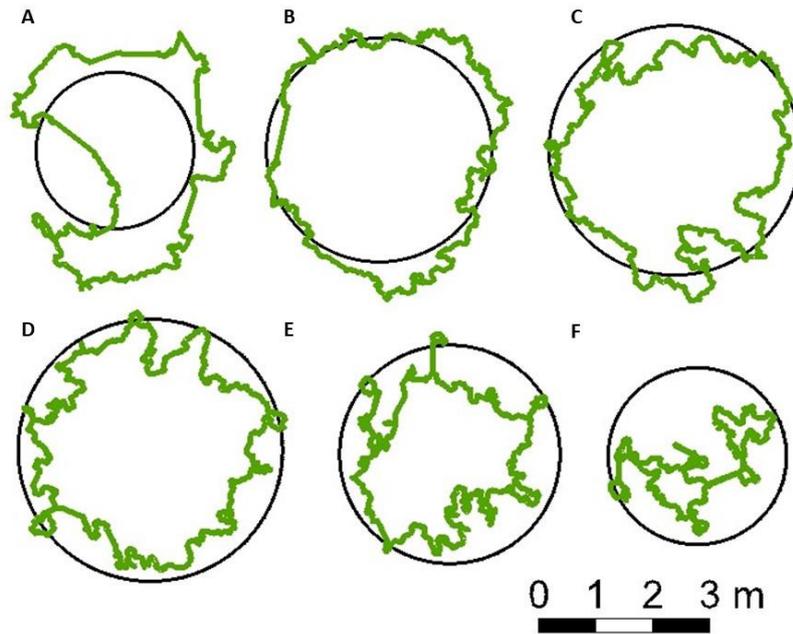


Figura 5. 17. Cross-sections at different heights (above sea level) of tree 7 for TM and HDS (contour). (A) Cross-section at 22.4 m. (B) Cross-section at 23 m. (C) Cross section at 23.4 m. (D) Cross-section at 24 m. (E) Cross-section at 24.5 m. (F) Cross-section at 24.7 m.

Tabla 5. 2. Results of the crown volumes (m^3) of the orange trees with each of the methods studied

Tree	TM	GM	UAV	HDS
1	5.067	N/A	2.866	3.172
6	7.949	5.005	3.591	3.797
5	9.76	5.741	3.378	5.378
2	11.235	12.343	8.712	6.854
9	16.081	10.092	11.991	7.737
3	16.295	10.466	5.237	6.814
4	18.014	16.18	9.53	9.676
8	23.4	16.655	14.329	9.926
7	32.079	18.844	17.151	13.952

Tabla 5. 3. Volume error with respect to the reference method (HDS)

Tree	TM		GM		UAV	
	Error (m ³)	%	Error (m ³)	%	Error (m ³)	%
6	4.152	109.3	-0.206	-5.4	1.208	31.8
5	4.382	81.5	-2	-37.2	0.363	6.7
3	9.481	139.1	-1.577	-23.1	3.652	53.6
2	4.381	63.9	1.858	27.1	5.489	80.1
4	8.338	86.2	-0.146	-1.5	6.504	67.2
9	8.344	107.8	4.254	55.0	2.355	30.4
8	13.474	135.7	4.403	44.4	6.729	67.8
7	18.127	129.9	3.199	22.9	4.892	35.1
Average		106.7		10.3		46.6
SD		27.6		32.4		24.6

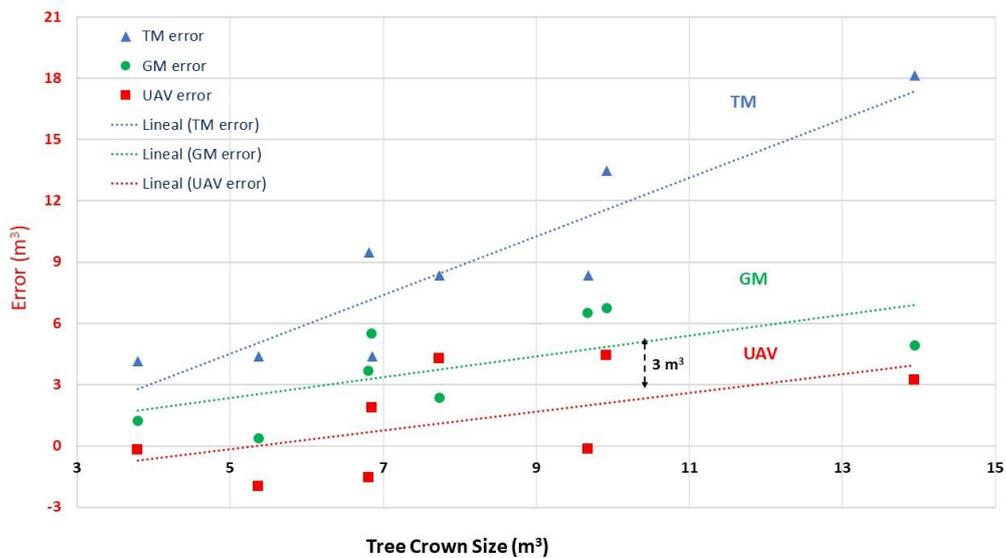


Figura 5. 18. Volume error (m3) related to absolute tree crown size

Once the conditions of normality and homoscedasticity were checked, the ANOVA test was performed. The results of the Bonferroni test are shown in Table 4.

Tabla 5. 4. Statistical analysis of the 4 methods

Method	LS Means (Volume)
HDS	7.478 a
UAV	8.532 ab
GM	11.916 ab
TM	15.513 b

Numbers with different letters in the column are different ($p < 0.05$; Bonferroni test)

5.5. Discussion

Figure 19 shows the progress of the research on the estimation of tree crown volume. It can be appreciated that the first techniques were based on aerial photography as the used in fifth inventory of the U.S. Forest Service [61]. Photogrammetric modelling of a tree from terrestrial stereo-photography was used from a long time ago [62]. Further, it has been done using aerial photogrammetry. There are numerous studies in the literature showing the benefits of the latter method. The first research was based on classical aerial photogrammetry, for example, on apple trees with Panchromatic images and 1:4000 scale, to obtain a DEM of the crop [9]. And more recently, low-cost systems such as UAVs have been used for these purposes [63,64]. LiDAR canopy characterization was also used early in forests highlighting that most crowns were asymmetrical for Queensland maple [65].

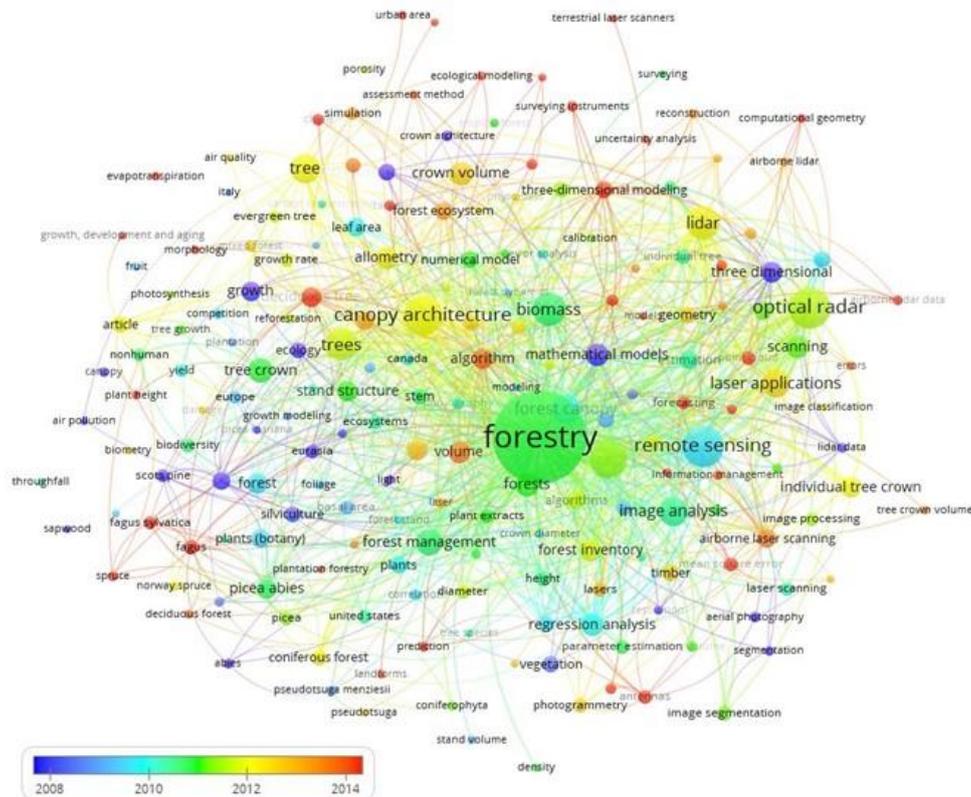


Figura 5. 19. Research trend evolution to tree crown volume estimation

According to the literature reviewed, the most accurate method of all is the one that uses the HDS [13] and therefore is the one used as a reference for the calculation of the relative error, obtaining Table 3. Here the deviations are obtained in % of the volume of the tree itself, taking as a reference volume that of the HDS. It can be seen that, on average, the TM has a 100% error, although the result may seem excessive, this is no surprise, since it is still lower than what other similar studies obtain, as the one carried out in Brazil also for orange trees obtaining approximately 150% larger than the volume from the LiDAR techniques [67], of course in this work the traditional methods of approximation are unrealistic (cube fit or cylinder-fit), but they are the ones used by the growers.

The UAV method has the lowest error as expected, on average 10%. So, also considering cost, it is clear that it is a very good method. The proposed GM method has proved to have an average error of less than 50%. It is therefore an alternative method to traditional methods, with the added advantages that the images are free. In addition, due to civil aviation rules, for example in Spain, there are many restricted areas for the flight of UAVs.

Figure 20 summarise the results obtained using the Bonferroni test (Table 4). As can be inferred from the statistical analysis, photogrammetric methods, i.e., UAV or GM, do not differ significantly from either TM or HDS. But the latter two, TM and HDS are significantly different from each other. If the LS means are observed, it can be seen, as was previously deduced qualitatively, which method is more precise: HDS, followed by UAV, GM and finally TM.

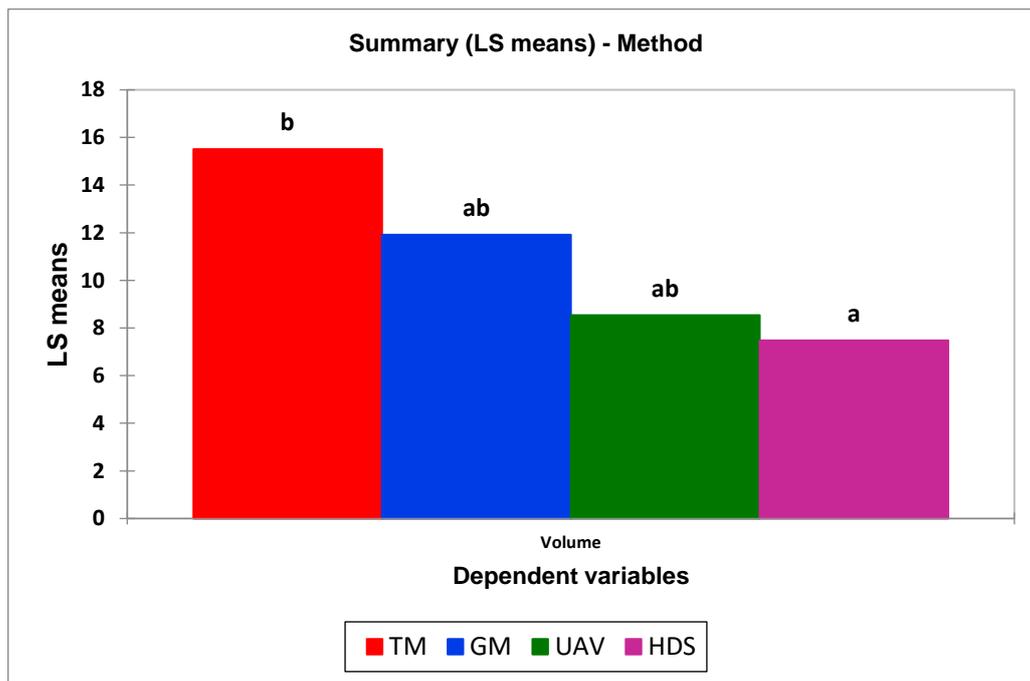


Figura 5. 20. Statistical analysis of the methods used (Bonferroni test)

5.6. Conclusions

The estimation of the volume of the treetops in general and of the orange trees, in particular, is an important subject of study for agriculture for the dosage of treatments, for the calculation of the biomass, or the calculation of the irrigation rates. The traditional methods have been replaced by more accurate methods, at first terrestrial photogrammetry, then aerial photogrammetry, and lately the HDS or TLS have appeared, and with the decrease in the price of UAVs, aerial photogrammetry has re-emerged but now at a low cost. Unfortunately, it is not always possible to carry out UAV flights throughout the territory, such as areas near airports, urban areas, or restricted areas in general.

In this research, the option of using GM images as a photogrammetric flight has been assessed, for situations in which it is not possible to fly with UAVs. After a statistical analysis of the results, it has been observed that the HDS method is the most accurate, followed by the UAV flight, then the proposed method using images from Google Maps (GM) and finally the traditional method measuring tree crown parameters in the field and approximating geometric figures. The two photogrammetric methods, with UAV and with GM, present significant differences between them, neither with the traditional methods nor with the HDS, then they can be used to compare them. However, there are significant differences between the traditional method and the HDS. Finally, it is necessary to be aware of the limitations found in this study, firstly that the updating of GM is not carried out periodically, and secondly the restriction for trees smaller than 5 m³ in volume. This work opens new opportunities to explore images from massive mapping platforms such as Google Maps for the assessment of tree crown volumes.

Author Contributions: Conceptualization, C.M.-B. and A.P.-R.; methodology, C.M.-B., A.P.-R., and F.M.-A.; resources: C.M.-B., F.T., and A.P.-R.; data collection, C.M.-B., F.T., and A.P.-R.; formal analysis: C.M.-B., F.T., and A.P.-R.; writing—original draft, C.M.-B., A.P.-R., and F.M.-A.; supervision, F.M.-A.; writing—review and editing, C.M.-B., A.P.-R., F.T., and F.M.-A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work has been partially supported by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness under the research projects HAR2014-53350-P and HAR2017-86334-R.

Acknowledgments: The authors would like to thank the University of Seville for allowing trials on its plots.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. Mention of trade names or commercial products in this publication is solely to provide specific information and does not imply recommendation or endorsement by the authors of this article.

5.7. References

1. Torres, J.; Valera, D.L.; Belmonte, L.J.; Herrero-Sánchez, C. Economic and Social Sustainability through Organic Agriculture: Study of the Restructuring of the Citrus Sector in the “Bajo Andarax” District (Spain). *Sustainability* **2016**, *8*, 918.
2. Zapata-Sierra, A.J.; Manzano-Agugliaro, F. Controlled deficit irrigation for orange trees in Mediterranean countries. *J. Clean. Prod.* **2017**, *162*, 130–140.
3. Gimenez, E.; Salinas, M.; Manzano-Agugliaro, F. Worldwide research on plant defense against biotic stresses as improvement for sustainable agriculture. *Sustainability* **2018**, *10*, 391.
4. Khefifi, H.; Selmane, R.; Ben Mimoun, M.; Tadeo, F.; Morillon, R.; Luro, F. Abscission of Orange Fruit (*Citrus sinensis* (L.) Osb.) in the Mediterranean Basin Depends More on Environmental Conditions Than on Fruit Ripeness. *Agronomy* **2020**, *10*, 591.
5. Whitney, J.D.; Tumbo, S.D.; Miller, W.M.; Wheaton, T.A. *Comparison between Ultrasonic and Manual Measurements of Citrus Tree Canopies*; Paper No. 021052; ASAE: 2002.
6. Doorenbos, J.; Pruitt, W.O. *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements*; FAO 24; Food and Agriculture Organization: Rome, Italy, 1977; pp. 1–60.
7. Smith, M.; Monteith, J.L.; Allen, R.G.; Perrier, A.; Pereira, L.S.; Segeren, A. *Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements*; Land and Water Development Division, FAO: Rome, Italy, 1998.
8. Hupert, H.; Gal, Y.; Peres, M. *Irrigation Coefficients and Water Amounts for Deciduous Orchards*; Soil and Irrigation Extension Service, Min. of Agric: Kiriath Shmona, Israel, 1997.
9. Meron, M.; Cohen, S.; Melman, G. Tree shape and volume measurement by light interception and aerial photogrammetry. *Trans. ASAE* **2000**, *43*, 475–481.
10. Márquez, A.L.; Baños, R.; Gil, C.; Montoya, M.G.; Manzano-Agugliaro, F.; Montoya, F.G. Multi-objective crop planning using pareto-based evolutionary algorithms. *Agric. Econ.* **2011**, *42*, 649–656.
11. Fuchs, M.; Cohen, Y.; Moreshet, S. Determining transpiration from meteorological data and crop characteristics for irrigation management. *Irrig. Sci.* **1987**, *8*, 91–99.
12. Padilla, F.M.; Gallardo, M.; Manzano-Agugliaro, F. Global trends in nitrate leaching research in the 1960–2017 period. *Sci. Total Environ.* **2018**, *643*, 400–413.
13. Miranda-Fuentes, A.; Llorens, J.; Gamarra-Diezma, J.L.; Gil-Ribes, J.A.; Gil, E. Towards an optimized method of olive tree crown volume measurement. *Sensors* **2015**, *15*, 3671–3687.
14. Walklate, P.J.; Cross, J.V.; Richardson, G.M.; Murray, R.A.; Baker, D.E. It—Information technology and the human interface: Comparison of different spray volume deposition models using lidar measurements of apple orchards. *Biosyst. Eng.* **2002**, *82*, 253–267.
15. Siegfried, W.; Viret, O.; Huber, B.; Wohlhauser, R. Dosage of plant protection products adapted to leaf area index in viticulture. *Crop. Prot.* **2007**, *26*, 73–82.
16. Fernández-Sarría, A.; Martínez, L.; Velázquez-Martí, B.; Sajdak, M.; Estornell, J.; Recio, J.A. Different methodologies for calculating crown volumes of *Platanus hispanica* trees using terrestrial laser scanner and a comparison with classical dendrometric measurements. *Comput. Electron. Agric.* **2013**, *90*, 176–185.
17. Dalponte, M.; Bruzzone, L.; Gianelle, D. A system for the estimation of single-tree stem diameter and volume using multireturn LiDAR data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2011**, *49*, 2479–2490.
18. Janott, M.; Gayler, S.; Gessler, A.; Javaux, M.; Klier, C.; Priesack, E. A one-dimensional model of water flow in soil-plant systems based on plant architecture. *Plant Soil* **2011**, *341*, 233–256.

19. Van Pelt, R.; North, M.P. Analyzing canopy structure in Pacific Northwest old-growth forests with a stand-scale crown model. *Northwest Sci.* **1996**, *70*, 15–30.
20. Yu, X.; Hyyppä, J.; Kukko, A.; Maltamo, M.; Kaartinen, H. Change detection techniques for canopy height growth measurements using airborne laser scanner data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **2006**, *72*, 1339–1348.
21. Rautiainen, M.; Möttöus, M.; Stenberg, P.; Ervasti, S. Crown envelope shape measurements and models. *Silva Fenn.* **2008**, *42*, 19.
22. Lindberg, E.; Olofsson, K.; Holmgren, J.; Olsson, H. Estimation of 3D vegetation structure from waveform and discrete return airborne laser scanning data. *Remote Sens. Environ.* **2012**, *118*, 151–161.
23. Sharma, R.P.; Vacek, Z.; Vacek, S. Individual tree crown width models for Norway spruce and European beech in Czech Republic. *For. Ecol. Manag.* **2016**, *366*, 208–220.
24. Krucek, M.; Trochta, J.; Cibulka, M.; Král, K. Beyond the cones: How crown shape plasticity alters aboveground competition for space and light-Evidence from terrestrial laser scanning. *Agric. For. Meteorol.* **2019**, *264*, 188–199.
25. Pretzsch, H.; Dieler, J. Evidence of variant intra-and interspecific scaling of tree crown structure and relevance for allometric theory. *Oecologia* **2012**, *169*, 637–649.
26. Kazmierczak, K.; Zawieja, B. Tree crown size as a measure of tree biosocial position in 135-year-old oak (*Quercus L.*) stand. *Folia For. Pol.* **2016**, *58*, 31–42.
27. Díaz-Varela, R.A.; De la Rosa, R.; León, L.; Zarco-Tejada, P.J. High-resolution airborne UAV imagery to assess olive tree crown parameters using 3D photo reconstruction: Application in breeding trials. *Remote Sens.* **2015**, *7*, 4213–4232.
28. Song, C.; Dickinson, M.B.; Su, L.; Zhang, S.; Yaussey, D. Estimating average tree crown size using spatial information from Ikonos and QuickBird images: Across-sensor and across-site comparisons. *Remote Sens. Environ.* **2010**, *114*, 1099–1107.
29. Falkowski, M.J.; Smith, A.M.; Hudak, A.T.; Gessler, P.E.; Vierling, L.A.; Crookston, N.L. Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data. *Can. J. Remote Sens.* **2006**, *32*, 153–161.
30. Gill, S.J.; Biging, G.S.; Murphy, E.C. Modeling conifer tree crown radius and estimating canopy cover. *For. Ecol. Manag.* **2000**, *126*, 405–416.
31. Purves, D.W.; Lichstein, J.W.; Pacala, S.W. Crown plasticity and competition for canopy space: A new spatially implicit model parameterized for 250 North American tree species. *PLoS ONE* **2007**, *2*, e870.
32. Goodwin, N.R.; Coops, N.C.; Culvenor, D.S. Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude. *Remote Sens. Environ.* **2006**, *103*, 140–152.
33. Leckie, D.G.; Gougeon, F.A.; Walsworth, N.; Paradine, D. Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis. *Remote Sens. Environ.* **2003**, *85*, 355–369.
34. Pretzsch, H.; Dieler, J. Evidence of variant intra-and interspecific scaling of tree crown structure and relevance for allometric theory. *Oecologia* **2012**, *169*, 637–649.
35. Popescu, S.C.; Wynne, R.H.; Nelson, R.F. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Can. J. Remote Sens.* **2003**, *29*, 564–577.
36. Breidenbach, J.; Næsset, E.; Lien, V.; Gobakken, T.; Solberg, S. Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data. *Remote Sens. Environ.* **2010**, *114*, 911–924.
37. Albrigo, L.G.; Anderson CAEdwards, G.J. Yield estimation of ‘Valencia’ orange research plots and groves. *Proc. Fla. State Hortic. Soc.* **1975**, *88*, 44–49.

38. Wheaton, T.A.; Whitney, J.D.; Castle, W.S.; Muraro, R.P.; Browning H.W.; Tucker, D.P.H. Citrus Scion and rootstock, topping height, and tree spacing affect tree size, yield, fruit quality, and economic return. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **1995**, *120*, 861–870.
39. Tumbo, S.D.; Salyani, M.; Whitney, J.D.; Wheaton, T.A.; Miller, W.M. Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume. *Appl. Eng. Agric.* **2002**, *18*, 367–372.
40. Stajnko, D.; Berk, P.; Lešnik, M.; Jejčič, V.; Lakota, M.; Strancar, A.; Hočevár, M.; Rakun, J. Programmable ultrasonic sensing system for targeted spraying in orchards. *Sensors* **2012**, *12*, 15500–15519.
41. Rosell, J.R.; Sanz, R. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Comput. Electron. Agric.* **2012**, *81*, 124–141.
42. Gil, E.; Escolà, A.; Rosell, J.R.; Planas, S.; Val, L. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop. Prot.* **2007**, *26*, 1287–1297.
43. Popescu, S.C.; Wynne, R.H.; Nelson, R.F. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Can. J. Remote Sens.* **2003**, *29*, 564–577.
44. Escolà, A.; Planas, S.; Rosell, J.; Pomar, J.; Camp, F.; Gracia, F.; Llorens, J.; Gil, E. Performance of an Ultrasonic Ranging Sensor in Apple Tree Canopies. *Sensors* **2011**, *11*, 2459–2477.
45. Méndez, V.; Pérez-Romero, A.; Sola-Guirado, R.; Miranda-Fuentes, A.; Manzano-Agugliaro, F.; Zapata-Sierra, A.; Rodríguez-Lizana, A. In-Field Estimation of Orange Number and Size by 3D Laser Scanning. *Agronomy* **2019**, *9*, 885.
46. Perea-Moreno, A.J.; Aguilera-Ureña, M.J.; Larriva, M.D.; Manzano-Agugliaro, F. Assessment of the potential of UAV video image analysis for planning irrigation needs of golf courses. *Water* **2016**, *8*, 584.
47. Fernández-Hernandez, J.; González-Aguilera, D.; Rodríguez-González, P.; Mancera-Taboada, J. Image-based modelling from unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry: An effective, low-cost tool for archaeological applications. *Archaeometry* **2015**, *57*, 128–145.
48. Grenzdörffer, G.J.; Engel, A.; Teichert, B. The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2008**, *31*, 1207–1214.
49. Inzerillo, L.; Leto Barone, F.; Roberts, R. 3D modeling of a complex building: From multi-view image fusion to google earth publication. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2019**, 577–584, doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-577-2019.
50. Hu, F.; Ge, J.; Lu, C.; Li, Q.; Lv, S.; Li, Y.; Liu, Y. Obtaining elevation of Oncomelania Hupensis habitat based on Google Earth and it's accuracy evaluation: An example from the Poyang lake region, China. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 515.
51. González-Delgado, J.Á.; Martínez-Graña, A.; Holgado, M.; Gonzalo, J.C.; Legoinha, P. Augmented Reality as a Tool for Promoting the Tourist Value of the Geological Heritage Around Natural Filming Locations: A Case Study in “Sad Hill” (The Good, the Bad and the Ugly Movie, Burgos, Spain). *Geoheritage* **2020**, *12*, 1–11.
52. Wernecke, J. *The KML Handbook: Geographic Visualization for the Web*; Pearson Education: 2008
53. Crampton, J.W.; Keyhole, Google Earth, and 3D Worlds: An Interview with Avi Bar-Zeev. *Cartogr. Int. J. Geogr. Inf. Geovis.* **2008**, *43*, 85–93.
54. Tsai, V.J.; Chen, J.H.; Huang, H.S. Traffic Sign Inventory from Google Street View Images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2016**, *41*, 243–246.
55. García-Albertos, P.; Picornell, M.; Salas-Olmedo, M.H.; Gutiérrez, J. Exploring the potential of mobile phone records and online route planners for dynamic accessibility analysis. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* **2019**, *125*, 294–307.

56. De Vries, S.; Buijs, A.E.; Langers, F.; Farjon, H.; van Hinsberg, A.; Sijtsma, F.J. Measuring the attractiveness of Dutch landscapes: Identifying national hotspots of highly valued places using Google Maps. *Appl. Geogr.* **2013**, *45*, 220–229.
57. Hu, S. Online Map Service Using Google Maps API and Other JavaScript Libraries: An Open Source Method. In *Online Maps with APIs and WebServices. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*; Peterson, M., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012; pp. 265–278, doi.org/10.1007/978-3-642-27485-5_17.
58. Turrell, F.M. Growth of the photosynthetic area of citrus. *Bot. Gaz.* **1961**, *122*, 284–298.
59. Schumann, A.W. Performance of an ultrasonic tree volume measurement system in commercial citrus groves. *Precis. Agric.* **2005**, *6*, 467–480.
60. Zaman, Q.U.; Salyani, M. Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurement of citrus tree volume. *Appl. Eng. Agric.* **2004**, *20*, 173.
61. O’Cuilinn, M. Wisconsin aerial photography project presents special challenges to contractors. *Earth Obs. Mag.* **1994**, *3*, pp. 44–46.
62. Allan, A.L. A simple control system for the photogrammetric survey of a tree. *Surv. Rev.* **1998**, *34*, 373–378.
63. Torres-Sánchez, J.; Lopez-Granados, F.; Serrano, N.; Arquero, O.; Peña, J.M. High-throughput 3-D monitoring of agricultural-tree plantations with unmanned aerial vehicle (UAV) technology. *PLoS ONE* **2015**, *10*, e0130479.
64. Panagiotidis, D.; Abdollahnejad, A.; Surový, P.; Chiteculo, V. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *Int. J. Remote Sens.* **2017**, *38*, 2392–2410.
65. Brown, P.L.; Doley, D.; Keenan, R.J. Estimating tree crown dimensions using digital analysis of vertical photographs. *Agric. For. Meteorol.* **2000**, *100*, 199–212.
66. Moorthy, I.; Miller, J.R.; Berni, J.A.J.; Zarco-Tejada, P.; Hu, B.; Chen, J. Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data. *Agric. For. Meteorol.* **2011**, *151*, 204–214.
67. Colaço, A.F.; Trevisan, R.G.; Molin, J.P.; Rosell-Polo, J.R. Orange tree canopy volume estimation by manual and LiDAR-based methods. *Adv. Anim. Biosci.* **2017**, *8*, 477–480.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES GENERALES

CONCLUSIONES GENERALES

Como conclusiones generales de esta tesis podemos citar

- La reducción de costes en los métodos fotogramétricos, gracias al empleo de los UAV y al desarrollo óptimo de los programas de SfM, posibilitan la implementación de esta técnica en áreas tan dispares como la arqueología o la ingeniería, obteniendo resultados muy satisfactorios en modelos 3D
- La utilización y establecimiento de una red de puntos de control con GNSS en RTK en zonas con orografía dispar y con climatología adversa hace que el uso de técnicas fotogramétricas se vea favorecidas y con resultados óptimos, llegando a obtener resoluciones de 3.5 cm/píxel en la ejecución de un vuelo UAV.
- La importancia de la georreferenciación se ha hecho palpable en esta tesis ya que se han realizado trabajos arqueológicos en campañas distintas y se ha comprobado que todo ha coincidido espacialmente debido a la implantación de un sistema de coordenadas común.
- Se ha puesto de manifiesto que el tiempo de registro de toda una excavación con la metodología empleada en Útica, una previa georreferenciación y a continuación un registro fotogramétrico SfM, es menor que el utilizado en técnicas tradicionales en la que se dibuja y registra manualmente.
- Los resultados obtenidos, ortofotos a escalas 1:1, permiten tener información digitalizada, que a través de software de sistemas de información geográfica permiten tener un registro para consultar y generar datos, coordenadas, distancias... con una precisión casi igual que si se estuviese en campo. Este registro digitalizado hace que estas nuevas técnicas aporten a la documentación, análisis y trabajo arqueológico una mejora en cuanto a precisión, rapidez y eficiencia en el registro de hallazgos.
- En cuanto a la comparativa entre SfM y HDS lo más significativo es que se ha confirmado que la metodología HDS presenta una serie de inconveniente en relación al material en el que incida el láser, esto provoca una diferencia más significativa entre los datos que aporta una estación total. Por el contrario, la técnica SfM se asemeja mucho o se puede decir que presenta la misma precisión que la estación total, además no está influenciada por el material en el que incida.
- En el ámbito de la agricultura se ha podido comprobar que el estudio de la copa de los árboles es fundamental para la dosificación de los tratamientos, para cálculo de la biomasa o las tasas de riego. Los métodos tradicionales para obtener el volumen de copa han sido sustituidos por las nuevas tecnologías y gracias al bajo coste de los UAVs, la fotogrametría aérea se ha posicionado como la mejor opción, debido a sus buenos resultados, el fácil manejo y la buena resolución que proporcionan la técnica SfM empleadas en sus *softwares*. El único condicionante negativo de esta metodología es la dificultad en realizar vuelos, por zonas conflictivas o licencias necesarias que no siempre son concedidas, por ello se ha experimentado con imágenes obtenidas de Google Map (GM) como si fuesen de un vuelo fotogramétrico, obteniendo muy buenos resultados. En cuanto a resultados después de un análisis estadístico, se ha observado que el

método HDS es el más preciso, seguido del UAV, luego el método propuesto en la utilización de imágenes de GM y finalmente el método tradicional.

Aunque el método de GM ha sido una técnica novedosa debemos tener en cuenta las limitaciones, GM no realiza actualizaciones periódicamente y presenta una restricción para los árboles de menos de 5 m³ de volumen.

CAPÍTULO 7

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- Aguilera, D., Lahoz, J., Finat, J., Martinez, J., Fernandez, J., & San Josem, J. (2006). Terrestrial laser Canning and low-cost aerial photogrammetry in the archeological modeling of a Jewish tanneries. *International Archives of Photogram., Remote Sensing*, 38, 5.
- Albertz, J. (2007). A look back. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(5), 504-506. <https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/2007journal/may/lookback.pdf>.
- Albrigo, L.G.; Anderson CAEdwards, G.J. Yield estimation of 'Valencia' orange research plots and groves. *Proc. Fla. State Hortic. Soc.* **1975**, 88, 44–49.
- Allan, A.L. A simple control system for the photogrammetric survey of a tree. *Surv. Rev.* **1998**, 34, 373–378.
- Altan, M. O., Celikoyan, T. M., Kemper, G., & Toz, G. (2004). Balloon photogrammetry for cultural heritage. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B5), 964-968.
- Barbieux, K., Constantin, D., & Merminod, B. (2016). CORRECTION OF AIRBORNE PUSHBROOM IMAGES ORIENTATION USING BUNDLE ADJUSTMENT OF FRAME IMAGES. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Bertrand_Merminod/publication/307530861_CORRECTION_OF_AIRBORNE_PUSHBROOM_IMAGES_ORIENTATION_USING_BUNDLE_ADJUSTMENT_OF_FRAME_IMAGES/links/58909f75aca272f9a556ba3d/CORRECTION-OF-AIRBORNE-PUSHBROOM-IMAGES-ORIENTATION-USING-BUNDLE-ADJUSTMENT-OF-FRAME-IMAGES.pdf
- Barceló, J. A., De Castro, O., Travet, D., & Vicente, O. (2003). A 3D model of an archaeological excavation. *The Digital Heritage of Archaeology. Computer Applications and Quantitative methods in Archaeology*, (33), 85.
- Barker, P. (1993). *Techniques of archaeological excavation*. Psychology Press.
- Bendea, H., Chiabrandò, F., Tonolo, F. G., & Marenchino, D. (2007, October). Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV. The Augusta Bagiennorum test site. In *XXI International CIPA Symposium* (Vol. 1).
- Bervoets, S. G. (1969). Review of developments in photogrammetry. *Australian Surveyor*, 22(7), 529-540.
- Bitelli, Gabriele, Maria Alessandra Tini, and Luca Vittuari. (2000) Close-range photogrammetry, virtual reality and their integration in archaeology. Volume 33, 2000, Pages 872-879. 19th International Congress for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS 2000; Amsterdam; Netherlands; 16 July 2000 through 23 July 2000; Code 135636.
- Brechtken, R., Przybilla, H. J., & Wahl, D. (2008). Visualisation of a Necropolis on the Basis of A Portable Aerial Photogrammetric System and Terrestrial Laser Scanning. ISPRS2008, Beijing, China.

- Breidenbach, J.; Næsset, E.; Lien, V.; Gobakken, T.; Solberg, S. Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data. *Remote Sens. Environ.* **2010**, *114*, 911–924.
- Boochs, F., Kern, F., Schütze, R., & Marbs, A. (2009). Approaches for geometrical and semantic modelling of huge unstructured 3D point clouds. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, *2009*(1), 65-77.
- Brown, P.L.; Doley, D.; Keenan, R.J. Estimating tree crown dimensions using digital analysis of vertical photographs. *Agric. For. Meteorol.* **2000**, *100*, 199–212.
- Buill Pozuelo, F. (2003). Fotogrametría analítica.
- Cardoso, J. L., Castro, J. L. L., Ferjaoui, A., Martín, A. M., Hahn Müller, V. M., & Jerbania, I. B. (2016). What the people of Utica (Tunisia) ate at a banquet in the 9th century BCE. Zooarchaeology of a North African early Phoenician settlement. *Journal of archaeological science: reports*, *8*, 314-322.
- Castro, J. L. L., Manzano-Agugliaro, F., & Ochotorena, B. A. (2010). Altos de Reveque: un asentamiento fortificado fenicio-púnico en el litoral de Andalucía oriental. *Archivo español de Arqueología*, *83*, 27-46.
- Chapman, H. P., & Van de Noort, R. (2001). High-resolution wetland prospection, using GPS and GIS: landscape studies at Sutton Common (South Yorkshire), and Meare Village East (Somerset). *Journal of Archaeological Science*, *28*(4), 365-375.
- Cheng, L., Chen, S., Liu, X., Xu, H., Wu, Y., Li, M., & Chen, Y. (2018). Registration of laser scanning point clouds: A review. *Sensors*, *18*(5), 1641.
- Cobos, Ó. J. C., Rogina, P. S., Vega, L. T., López, Ó. R., Casuso, D. A., Almazán, D. V., & Vidal, E. S. (2015). Virtual documentation of different structures in the urban archaeological site of Velarde Square in Santander. In *2015 Digital Heritage* (Vol. 2, pp. 691-694). IEEE.
- Colaço, A.F.; Trevisan, R.G.; Molin, J.P.; Rosell-Polo, J.R. Orange tree canopy volume estimation by manual and LiDAR-based methods. *Adv. Anim. Biosci.* **2017**, *8*, 477–480.
- Collis, J. (1996). *Digging up the past: an introduction to archaeological excavation*. The History Press.
- Corns, A., & Shaw, R. (2009). High resolution 3-dimensional documentation of archaeological monuments & landscapes using airborne LiDAR. *Journal of Cultural Heritage*, *10*, e72-e77.

- Cowgill, G. L. (2015). The Teotihuacan Mapping Project: experiences with data files, big questions, and some research priorities for Teotihuacan. *Ancient Mesoamerica*, 26(1), 153.
- Crampton, J.W.; Keyhole, Google Earth, and 3D Worlds: An Interview with Avi Bar-Zeev. *Cartogr. Int. J. Geogr. Inf. Geovis.* **2008**, 43, 85–93.
- da Silva, D. C. (2012). EVOLUTION OF PHOTOGRAMMETRY IN BRAZIL. *Revista Brasileira de Cartografia*, 64(4).
- Daakir, M., Pierrot-Deseilligny, M., Bosser, P., Pichard, F., Thom, C., & Rabot, Y. (2016). Study of lever-arm effect using embedded photogrammetry and on-board GPS receiver on UAV for metrological mapping purpose and proposal of a free ground measurements calibration procedure. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 9. Volume 40, Issue 3W4, 17 March 2016, Pages 65-70 European Calibration and Orientation Workshop, EuroCOW 2016; Lausanne; Switzerland; 10 February 2016 through 12 February 2016; Code 121090
- Dalponte, M.; Bruzzone, L.; Gianelle, D. A system for the estimation of single-tree stem diameter and volume using multireturn LiDAR data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2011**, 49, 2479–2490.
- De Vries, S.; Buijs, A.E.; Langers, F.; Farjon, H.; van Hinsberg, A.; Sijtsma, F.J. Measuring the attractiveness of Dutch landscapes: Identifying national hotspots of highly valued places using Google Maps. *Appl. Geogr.* **2013**, 45, 220–229.
- Delile, H., Abichou, A., Gadhoun, A., Goiran, J. P., Pleuger, E., Monchambert, J. Y., ... & Ghazzi, F. (2015). The geoarchaeology of Utica, Tunisia: The paleogeography of the Mejerda Delta and hypotheses concerning the location of the ancient harbor. *Geoarchaeology*, 30(4), 291-306.
- Dell'Unto, N., Landeschi, G., Touati, A. M. L., Dellepiane, M., Callieri, M., & Ferdani, D. (2016). Experiencing ancient buildings from a 3D GIS perspective: a case drawn from the Swedish Pompeii Project. *Journal of archaeological method and theory*, 23(1), 73-94.
- den Hartog, K. (2007). Susan Collett: Impluvium. *Ceramics Art and Perception*, (67), 52.
- Díaz-Varela, R.A.; De la Rosa, R.; León, L.; Zarco-Tejada, P.J. High-resolution airborne UAV imagery to assess olive tree crown parameters using 3D photo reconstruction: Application in breeding trials. *Remote Sens.* **2015**, 7, 4213–4232.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W.O. *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements*; FAO 24; Food and Agriculture Organization: Rome, Italy, 1977; pp. 1–60.

- Dorrell, P. G. (1994). *Photography in archaeology and conservation*. Cambridge University Press.
- Drap, P., Merad, D., Hijazi, B., Gaoua, L., Nawaf, M. M., Saccone, M., & Castro, F. (2015). Underwater photogrammetry and object modeling: a case study of Xlendi Wreck in Malta. *Sensors*, *15*(12), 30351-30384.
- Drap, P., Seinturier, J., Hijazi, B., Merad, D., Boi, J. M., Chemisky, B., ... & Long, L. (2015). The ROV 3D Project: Deep-sea underwater survey using photogrammetry: Applications for underwater archaeology. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, *8*(4), 1-24.
- Eisenbeiss, H., & Zhang, L. (2006). Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *36*(5), 90-96.
- Eisenbeiss, H., & Sauerbier, M. (2011). Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications. *The Photogrammetric Record*, *26*(136), 400-421.
- Escolá, A.; Planas, S.; Rosell, J.; Pomar, J.; Camp, F.; Gracia, F.; Llorens, J.; Gil, E. Performance of an Ultrasonic Ranging Sensor in Apple Tree Canopies. *Sensors* **2011**, *11*, 2459–2477.
- Fabris, M., Achilli, V., Artese, G., Bragagnolo, D., & Menin, A. (2012). High Resolution Survey of Phaistos Palace (crete) by TIs and Terrestrial Photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *39*, B5.
- Falkowski, M.J.; Smith, A.M.; Hudak, A.T.; Gessler, P.E.; Vierling, L.A.; Crookston, N.L. Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data. *Can. J. Remote Sens.* **2006**, *32*, 153–161.
- Fentress, E., Ghazzi, F., Quinn, J., & Wilson, A. I. (2013). Excavations at Utica by the Tunisian-British Utica Project 2012. Disponible en https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:f0070380-0fea-4aab-b020-cc072aaccd8c/download_file?file_format=pdf&safe_filename=Utica%2BReport%2B2012.pdf&type_of_work=Report
- Fernández-Hernandez, J., González-Aguilera, D., Rodríguez-González, P., & Mancera-Taboada, J. (2015). Image-based modelling from unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry: an effective, low-cost tool for archaeological applications. *Archaeometry*, *57*(1), 128-145.
- Fernández-Sarría, A.; Martínez, L.; Velázquez-Martí; B; Sajdak, M.; Estornell, J.; Recio, J.A. Different methodologies for calculating crown volumes of *Platanus hispanica* trees using terrestrial laser scanner and a comparison with classical dendrometric measurements. *Comput. Electron. Agric.* **2013**, *90*, 176–185.

- Fuchs, M.; Cohen, Y.; Moreshet, S. Determining transpiration from meteorological data and crop characteristics for irrigation management. *Irrig. Sci.* **1987**, *8*, 91–99.
- Furukawa, Y., & Ponce, J. (2010). Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *32*(8), 1362-1376. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.161>.
- García-Albertos, P.; Picornell, M.; Salas-Olmedo, M.H.; Gutiérrez, J. Exploring the potential of mobile phone records and online route planners for dynamic accessibility analysis. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* **2019**, *125*, 294–307.
- Garrido-Cardenas, J. A., Mesa-Valle, C., & Manzano-Agugliaro, F. (2018a). Trends in plant research using molecular markers. *Planta*, *247*(3), 543-557.
- Garrido-Cardenas, J. A., Mesa-Valle, C., & Manzano-Agugliaro, F. (2018b). Human parasitology worldwide research. *Parasitology*, *145*(6), 699-712.
- Gerke, M., & Przybilla, H. J. (2016). Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, *2016*(1), 17-30.
- Gil, E.; Escolà, A.; Rosell, J.R.; Planas, S.; Val, L. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop. Prot.* **2007**, *26*, 1287–1297.
- Gill, S.J.; Biging, G.S.; Murphy, E.C. Modeling conifer tree crown radius and estimating canopy cover. *For. Ecol. Manag.* **2000**, *126*, 405–416.
- Gimenez, E.; Salinas, M.; Manzano-Agugliaro, F. Worldwide research on plant defense against biotic stresses as improvement for sustainable agriculture. *Sustainability* **2018**, *10*, 391.
- Gindraux, S., Boesch, R., & Farinotti, D. (2017). Accuracy assessment of digital surface models from unmanned aerial vehicles' imagery on glaciers. *Remote Sensing*, *9*(2), 186.
- Glaser, G. H., & Saliba, M. S. (1972). Application of sparse matrices to analytical photogrammetry. In *Sparse Matrices and Their Applications* (pp. 135-146). Springer, Boston, MA.
- Goodwin, N.R.; Coops, N.C.; Culvenor, D.S. Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude. *Remote Sens. Environ.* **2006**, *103*, 140–152.
- González-Delgado, J. Á., Martínez-Graña, A., Holgado, M., Gonzalo, J. C., & Legoinha, P. (2020). Augmented Reality as a Tool for Promoting the Tourist Value of the Geological Heritage Around Natural Filming Locations: a Case Study in “Sad Hill”(The Good, the Bad and the Ugly Movie, Burgos, Spain). *Geoheritage*, *12*, 1-11.
- Grenzdörffer, G. J., Engel, A., & Teichert, B. (2008). The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *31*(B3), 1207-1214.

- Gressin, A., Mallet, C., Demantké, J., & David, N. (2013). Towards 3D lidar point cloud registration improvement using optimal neighborhood knowledge. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 79, 240-251.
- Gruenkemeier, A. (2008). 3D-documentation technologies for use in industrial archaeology applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37. Volume 37, 2008, Pages 291-295. 2008 21st ISPRS International Congress for Photogrammetry and Remote Sensing; Beijing; China; 3 July 2008 through 11 July 2008; Code 133797.
- Grussenmeyer, P., Landes, T., Alby, E., & Carozza, L. (2010). High resolution 3D recording and modelling of the Bronze Age cave “Les Fraux” in Périgord (France). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 38, 262-267.
- Han, S., & Hong, C. K. (2019). Assessment of Parallel Computing Performance of Agisoft Metashape for Orthomosaic Generation. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 37(6), 427-434.
- Hood, J. S. R. (1977). Photogrammetry and field archaeology. *Antiquity*, 51(202), 151.
- Hu, S. Online Map Service Using Google Maps API and Other JavaScript Libraries: An Open Source Method. In *Online Maps with APIs and WebServices. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*; Peterson, M., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012; pp. 265-278, doi.org/10.1007/978-3-642-27485-5_17.
- Hu, F., Ge, J., Lu, C., Li, Q., Lv, S., Li, Y., ... & Liu, Y. (2020). Obtaining elevation of Oncomelania Hupensis habitat based on Google Earth and it's accuracy evaluation: an example from the Poyang lake region, China. *Scientific Reports*, 10(1), 1-9.
- Hupert; H.; Gal, Y.; Peres, M. *Irrigation Coefficients and Water Amounts for Deciduous Orchards*; Soil and Irrigation Extension Service, Min. of Agric: Kiriati Shmona, Israel, 1997.
- Inzerillo, L., Leto Barone, F., & Roberts, R. (2019). 3D MODELING OF A COMPLEX BUILDING: FROM MULTI-VIEW IMAGE FUSION TO GOOGLE EARTH PUBLICATION. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- Janott, M.; Gayler, S.; Gessler, A.; Javaux, M.; Klier, C.; Priesack, E. A one-dimensional model of water flow in soil-plant systems based on plant architecture. *Plant Soil* **2011**, 341, 233–256.
- Jerbania, I. B., & Redissi, T. (2014). Utique et la Méditerranée centrale à la fin du IXe s. et au VIIIe s. av. J.-C.: les enseignements de la céramique grecque géométrique. *Utique et la Méditerranée centrale à la fin du IXe s. et au VIIIe s. av. J.-C.: les enseignements de la céramique grecque géométrique. Rivista di Studi Fenici*, (42), 177-204.

- Kang, D. S., Lee, H. M., Park, H. S., & Lee, I. (2007). Computing method for estimating strain and stress of steel beams using terrestrial laser scanning and FEM. In *Key Engineering Materials* (Vol. 347, pp. 517-522). Trans Tech Publications Ltd
- Kazmierczak, K.; Zawieja, B. Tree crown size as a measure of tree biosocial position in 135-year-old oak (*Quercus L.*) stand. *Folia For. Pol.* **2016**, *58*, 31–42.
- Kersten, T. P. (2018, October). 3D Models and Virtual Tours for a Museum Exhibition of Vietnamese Cultural Heritage Exhibits and Sites. In *Euro-Mediterranean Conference* (pp. 528-538). Springer, Cham. Volume 11196 LNCS, 2018, Pages 528-538. 7th International Conference on Digital Heritage, EuroMed 2018; Nicosia; Cyprus; 29 October 2018 through 3 November 2018; Code 219789.
- Khefifi, H.; Selmane, R.; Ben Mimoun, M.; Tadeo, F.; Morillon, R.; Luro, F. Abscission of Orange Fruit (*Citrus sinensis* (L.) Osb.) in the Mediterranean Basin Depends More on Environmental Conditions Than on Fruit Ripeness. *Agronomy* **2020**, *10*, 591.
- Koistinen, K. (2000). 3D Documentation for archaeology during Finnish Jabal Haroun project. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, *33*(B5/1; PART 5), 440-44.
- Krucek, M.; Trochta, J.; Cibulka, M.; Král, K. Beyond the cones: How crown shape plasticity alters aboveground competition for space and light-Evidence from terrestrial laser scanning. *Agric. For. Meteorol.* **2019**, *264*, 188–199.
- la Cruz-Lovera, D., Perea-Moreno, A. J., la Cruz-Fernández, D., Alvarez-Bermejo, J. A., & Manzano-Agugliaro, F. (2017). Worldwide research on energy efficiency and sustainability in public buildings. *Sustainability*, *9*(8), 1294.
- Large, A. R., Heritage, G. L., & Charlton, M. E. (2009). 16 Laser Scanning: The Future. *Laser Scanning for the Environmental Sciences*, 262.
- Leckie, D.G.; Gougeon, F.A.; Walsworth, N.; Paradine, D. Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis. *Remote Sens. Environ.* **2003**, *85*, 355–369.
- Lerma García, J. L., Van Genechten, B., & Santana Quintero, M. (2008). 3D Risk Mapping. Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning. Training Material Based on Practical Applications.
- Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M., & Villaverde, V. (2010). Terrestrial laser scanning and close-range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, *37*(3), 499-507.

- Lézine, A. (1966) Utique, notes de topographie. In R. Chevallier (ed.) *Mélanges d'archéologie et d'histoire offerts à André Piganiol* vol. 3: 1241-1255. Paris, S.E.V.P.E.N. Lézine, A. (1968) Carthage. Utique. *Études d'architecture et d'urbanisme*. Paris, Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique.
- Lézine, A. (1970) Utique. Tunis, Société Tunisienne de Diffusion.
- Li, X., Ge, M., Dai, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J., & Schuh, H. (2015). Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. *Journal of Geodesy*, 89(6), 607-635.
- Liang, X., Kankare, V., Hyyppä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., & Holopainen, M. (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 63-77.
- Liang, J., Gong, J., & Li, W. (2018). Applications and impacts of Google Earth: A decadal review (2006–2016). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 91-107.
- Lin, J., Wang, R., Li, L., & Xiao, Z. (2019, July). A workflow of SfM-based digital outcrop reconstruction using Agisoft PhotoScan. In *2019 IEEE 4th International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)* (pp. 711-715). IEEE
- Lindberg, E.; Olofsson, K.; Holmgren, J.; Olsson, H. Estimation of 3D vegetation structure from waveform and discrete return airborne laser scanning data. *Remote Sens. Environ.* **2012**, *118*, 151–161.
- Liu, C., McAree, O., & Chen, W. H. (2012, September). Path following for small UAVs in the presence of wind disturbance. In *Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control* (pp. 613-618). IEEE.
- López Castro, A. Ferjaoui, J.A. Peña Ruano, T. Teixidó, Ullod, M. Ghazouami, A. Adroher, M. Ben Nejma (2012). Proyecto Utica. Informe de los trabajos arqueológicos efectuados en la ciudad fenicio-púnica de Utica (Túnez). Campaña de 2010. *Informes y Trabajos*, (7), 360-371.
- López Castro, Ferjaoui, I. Ben Jerbania, K. Jendoubi, E. Ferrer Albelda, I. Fumadó Ortega, V. Martínez Hahn Müller, C.A. Pardo Barrionuevo, A. Sánchez Moreno, I. Fumadó Ortega, A. Mederos Martín, S. Carpintero Lozano, C. Dhibi, G. Maldonado López, B. Mora Serrano, A. Niveau de Villedary, V. Peña Romo, I. Souissi, W. Khalfalli, L.A. Ruiz Cabrero, F. Dridi, F. y Essaadi. Proyecto Utica. Exc. avaciones en la ciudad fenicio-púnica. Campañas de 2013 y 2014. *Informes y trabajos*, 12 (2015), pp. 259-280.
- López Castro, A. Ferjaoui, A. Adroher, F. Arbi, I. Ben Jerbania, F. Dridi, F. Essaadi, E. Ferrer Albelda, I. Fumadó, V. Martínez Hahn Müller, A. Mederos, C.A. Pardo Barrionuevo, V. Peña Romo, A. Sánchez Moreno. Proyecto Útica. Investigación en la ciudad fenicio-púnica. *Informe y trabajos*, 11 (2014), pp. 201-219.

- López Castro, J. L., Ferjaou, A., Mederos Martín, A., Martínez Hahn Müller, V., & Jerbania, I. B. (2016). La colonización fenicia inicial en el Mediterráneo Central: nuevas excavaciones arqueológicas en Utica (Túnez). *Trabajos de Prehistoria* 73 (1), 68-89.
- López, J. B., Jiménez, G. A., Romero, M. S., García, E. A., Martín, S. F., Medina, A. L., & Guerrero, J. E. (2016). 3D modelling in archaeology: The application of Structure from Motion methods to the study of the megalithic necropolis of Panoria (Granada, Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10, 495-506.
- Lowe, D.G. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. In Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision (Vol. 2, pp. 1150-1157). Kerkyra, Greece. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1999.790410>
- Lucas Jr, H. C., & Goh, J. M. (2009). Disruptive technology: How Kodak missed the digital photography revolution. *The Journal of Strategic Information Systems*, 18(1), 46-55.
- Mahiddine, A., Seinturier, J., Boï, D. P. J. M., Drap, P., Merad, D., & Long, L. (2012, September). Underwater image preprocessing for automated photogrammetry in high turbidity water: An application on the Arles-Rhone XIII roman wreck in the Rhodano river, France. In 2012 18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (pp. 189-194). IEEE.
- Mali, V. K., & Kuiry, S. N. (2018). Assessing the accuracy of high-resolution topographic data generated using freely available packages based on SfM-MVS approach. *Measurement*, 124, 338-350.
- Márquez, A.L.; Baños, R.; Gil, C.; Montoya, M.G.; Manzano-Agugliaro, F.; Montoya, F.G. Multi-objective crop planning using pareto-based evolutionary algorithms. *Agric. Econ.* **2011**, 42, 649–656.
- Méndez, V.; Pérez-Romero, A.; Sola-Guirado, R.; Miranda-Fuentes, A.; Manzano-Agugliaro, F.; Zapata-Sierra, A.; Rodríguez-Lizana, A. In-Field Estimation of Orange Number and Size by 3D Laser Scanning. *Agronomy* **2019**, 9, 885.
- Meron, M.; Cohen, S.; Melman, G. Tree shape and volume measurement by light interception and aerial photogrammetry. *Trans. ASAE* **2000**, 43, 475–481.
- Meyer, É., Grussenmeyer, P., Tidafi, T., Parisel, C., & Revez, J. (2004, July). Photogrammetry for the epigraphic survey in the great hypostyle hall of Karnak temple: a new approach. In *Proceedings of the XXth Congress of the ISPRS, Istanbul, Turkey* (pp. 12-23).
- Millon, R. (1964). The Teotihuacan mapping project. *American Antiquity*, 345-352.
- Millon, R., & Altschul, J. H. (2015). The making of the map: the origin and lessons of the Teotihuacan Mapping Project. *Ancient Mesoamerica*, 26(1), 135.

- Miranda-Fuentes, A.; Llorens, J.; Gamarra-Diezma, J.L.; Gil-Ribes, J.A.; Gil, E. Towards an optimized method of olive tree crown volume measurement. *Sensors* **2015**, *15*, 3671–3687.
- Mokros, M., Hollaus, M., Wang, Y., & Liang, X. (2020, May). SFM-Forest-Benchmark project: The benchmarking of image-based point cloud for forest inventory. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 5822).
- Monchambert J.-Y., Jerbania I.B., M. Belarbi, L. Bonadies, H. Bricchi-Duhem, M. De Jonghe, Y. Gallet, J. Nacef, Y., A. Tekki, E. Thébault, S. Vermeulen. Utique, Rapport préliminaire sur les deux premières campagnes de fouilles de la mission francotunisienne, 2011 et 2012.
- Moorthy, I.; Miller, J.R.; Berni, J.A.J.; Zarco-Tejada, P.; Hu, B.; Chen, J. Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data. *Agric. For. Meteorol.* **2011**, *151*, 204–214.
- Mora Torcal, R., Martínez-Moreno, J., Roda Gilabert, X., Roy Sinyer, M., Vega Bolivar, S., (2014). Treballs d'Arqueologia, Nº20.
- Moulard, J. (1924) Fouilles et découvertes à Utique. Bulletin archéologique du Comité des travaux historiques et scientifiques : 141-156.
- Moulard, J. (1926) Fouilles à Utique en 1925. Bulletin archéologique du Comité des travaux historiques et scientifiques : 225-235.
- Museo de Altamira. (2018). Consultado 18/07/2020. Disponible on-line <http://www.culturaydeporte.gob.es/mnaltamira/dam/jcr:5acc5e6f-51b4-403c-a0a0-40effcc7cfea/catalogo-el-aerte-de-reproducir-el-arte.pdf>
- Nesbit, P. R., & Hugenholtz, C. H. (2019). Enhancing UAV–SFM 3D model accuracy in high-relief landscapes by incorporating oblique images. *Remote Sensing*, *11*(3), 239.
- Neto, F.A. (2000). 3D modeling and photogrammetry-supported GIS in archaeology. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 33, pp. 574-579.
- Newcomb, R. M. (1971). Celtic fields in Himmerland, Denmark, as revealed by vertical photography at a scale of 1: 25,000. *Photogrammetria*, *27*(3), 101-113.
- New York University, C.S.D., 2016. NYU. Courant. Computer Science. Disponible en <http://bit.ly/2bFUZqY>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, *6*(1), 1-15.
- Núñez, M. A., Buill, F., & Edo, M. (2013). 3D model of the Can Sadurní cave. *Journal of archaeological Science*, *40*(12), 4420-4428.

O’Cuilinn, M. Wisconsin aerial photography project presents special challenges to contractors. *Earth Obs. Mag.* **1994**, 3, pp. 44-46.

Orengo, H. A. (2013). Combining terrestrial stereophotogrammetry, DGPS and GIS-based 3D voxel modelling in the volumetric recording of archaeological features. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, 49-55.

Padilla, F.M.; Gallardo, M.; Manzano-Agugliaro, F. Global trends in nitrate leaching research in the 1960–2017 period. *Sci. Total Environ.* **2018**, 643, 400–413.

Panagiotidis, D.; Abdollahnejad, A.; Surovy, P.; Chiteculo, V. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *Int. J. Remote Sens.* **2017**, 38, 2392–2410.

Park, H., & Lee, D. (2019). Comparison between point cloud and mesh models using images from an unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 138, 461-466.

Peña-Villasenín, S., Gil-Docampo, M., & Ortiz-Sanz, J. (2019). Professional SfM and TLS vs a simple SfM photogrammetry for 3D modelling of rock art and radiance scaling shading in engraving detection. *Journal of Cultural Heritage*, 37, 238-246.

Perea-Moreno, A. J., Aguilera-Ureña, M. J., Larriva, M. D., & Manzano-Agugliaro, F. (2016). Assessment of the potential of UAV video image analysis for planning irrigation needs of golf courses. *Water*, 8(12), 584.

Pereira Uzal, J. M. (2013). Modelado 3D en patrimonio cultural por técnicas de structure from motion. ph investigación

Pérez, J. A., Bascon, F. M., & Charro, M. C. (2014). Photogrammetric usage of 1956–57 USAF aerial photography of Spain. *The Photogrammetric Record*, 29(145), 108-124.

Pierdicca, R., Frontoni, E., Malinverni, E. S., Colosi, F., & Orazi, R. (2016). Virtual reconstruction of archaeological heritage using a combination of photogrammetric techniques: Huaca Arco Iris, Chan Chan, Peru. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 3(3), 80-90.

Pollefeys, M., Koch, R., Vergauwen, M., & Van Gool, L. (2000). Automated reconstruction of 3D scenes from sequences of images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55(4), 251-267.

Popescu, S.C.; Wynne, R.H.; Nelson, R.F. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Can. J. Remote Sens.* **2003**, 29, 564–577.

Pretzsch, H.; Dieler, J. Evidence of variant intra-and interspecific scaling of tree crown structure and relevance for allometric theory. *Oecologia* **2012**, 169, 637–649.

- Purves, D.W.; Lichstein, J.W.; Pacala, S.W. Crown plasticity and competition for canopy space: A new spatially implicit model parameterized for 250 North American tree species. *PLoS ONE* **2007**, *2*, e870.
- Rautiainen, M.; Möttöus, M.; Stenberg, P.; Ervasti, S. Crown envelope shape measurements and models. *Silva Fenn.* **2008**, *42*, 19.
- Renfrew, C., & Bahn, P. (2007). *Arqueología: Teorías, Métodos y Práctica* (Tercera ed.). (M. J. Mosquera Rial, Trad.) Madrid: Akal
- Renfrew, C., & Bahn, P. (2008). *Arqueología conceptos clave*. (D. Govantes, Trad.) Madrid: Akal.
- Rosell, J.R.; Sanz, R. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Comput. Electron. Agric.* **2012**, *81*, 124–141.
- Salmerón-Manzano, E., & Manzano-Agugliaro, F. (2019). Unaccompanied Minors: Worldwide Research Perspectives. *Publications*, *7*(1), 2.
- San-Antonio-Gómez, C., Velilla, C., & Manzano-Agugliaro, F. (2014). Urban and landscape changes through historical maps: The Real Sitio of Aranjuez (1775–2005), a case study. *Computers, environment and urban systems*, *44*, 47-58.
- San-Antonio-Gómez, C., Velilla, C., & Manzano-Agugliaro, F. (2015). Photogrammetric techniques and surveying applied to historical map analysis. *Survey Review*, *47*(341), 115-128.
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018). Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*, *10*(10), 1606.
- Sauerbier, M., & Eisenbeiss, H. (2010). UAVs for the documentation of archaeological excavations. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *38*(5), 526-531.
- Schumann, A.W. Performance of an ultrasonic tree volume measurement system in commercial citrus groves. *Precis. Agric.* **2005**, *6*, 467–480.
- Sear, F. (2020). *Roman architecture*. Routledge.
- Shanks, M., & Svabo, C. (2013). Archaeology and photography: A pragmatology. In *Reclaiming Archaeology* (pp. 105-118). Routledge.
- Sharma, R.P.; Vacek, Z.; Vacek, S. Individual tree crown width models for Norway spruce and European beech in Czech Republic. *For. Ecol. Manag.* **2016**, *366*, 208–220.

- Siegfried, W.; Viret, O.; Huber, B.; Wohlhauser, R. Dosage of plant protection products adapted to leaf area index in viticulture. *Crop. Prot.* **2007**, *26*, 73–82.
- Smith, M.; Monteith, J.L.; Allen, R.G.; Perrier, A.; Perreira, L.S.; Segeren, A. *Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements*; Land and Water Development Division, FAO: Rome, Italy, 1998.
- Smith, N. G., Knabb, K., DeFanti, C., Weber, P., Schulze, J., Prudhomme, A., & DeFanti, T. A. (2013, October). ArtifactVis2: Managing real-time archaeological data in immersive 3D environments. In *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)* (Vol. 1, pp. 363-370). IEEE.
- Smith, N. G., Howland, M., & Levy, T. E. (2015). Digital archaeology field recording in the 4th dimension: ArchField C++ a 4D GIS for digital field work. In *2015 Digital Heritage* (Vol. 2, pp. 251-258). IEEE.
- Song, C.; Dickinson, M.B.; Su, L.; Zhang, S.; Yaussey, D. Estimating average tree crown size using spatial information from Ikonos and QuickBird images: Across-sensor and across-site comparisons. *Remote Sens. Environ.* **2010**, *114*, 1099–1107.
- Song, D., Yang, W., & Zhao, P. (1990, August). Photogrammetry and remote sensing project in survey of the Emperor Qin Shi Huang's mausoleum. In *Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision* (Vol. 1395, p. 13952F). International Society for Optics and Photonics.
- Stajanko, D.; Berk, P.; Lešnik, M.; Ježič, V.; Lakota, M.; Strancar, A.; Hočvar, M.; Rakun, J. Programmable ultrasonic sensing system for targeted spraying in orchards. *Sensors* **2012**, *12*, 15500–15519.
- Teixidó, T., Peña, J. A., López Castro, J. L., Ibáñez Castro, A., Sierra, M., & Ferjaoui, A. (2012). Prospección magnética y georrádar 3D para delimitación y caracterización de yacimientos arqueológicos: casos de estudio. <https://digibug.ugr.es/handle/10481/23534>.
- Teixidó, M. T., & Peña, J. A. (2019). The Utility of Geophysical Models in Archaeology: Illustrative Case Studies. In *Archaeogeophysics* (pp. 169-181). Springer, Cham.
- Theodoridou, S., Tokmakidis, K., & Skarlatos, D. (2000). Use of radio-controlled model helicopters in archaeology surveying and in building construction industry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, *33*(B5/2; PART 5), 825-829.
- Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., Abellán, A., & Jordá, L. (2016). Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos.
- Torres-Sánchez, J.; Lopez-Granados, F.; Serrano, N.; Arquero, O.; Peña, J.M. High-throughput 3-D monitoring of agricultural-tree plantations with unmanned aerial vehicle (UAV) technology. *PLoS ONE* **2015**, *10*, e0130479.

- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Borra-Serrano, I., & Peña, J. M. (2018). Assessing UAV-collected image overlap influence on computation time and digital surface model accuracy in olive orchards. *Precision Agriculture*, *19*(1), 115-133.
- Torres, J.; Valera, D.L.; Belmonte, L.J.; Herrero-Sánchez, C. Economic and Social Sustainability through Organic Agriculture: Study of the Restructuring of the Citrus Sector in the “Bajo Andarax” District (Spain). *Sustainability* **2016**, *8*, 918.
- Tsai, V.J.; Chen, J.H.; Huang, H.S. Traffic Sign Inventory from Google Street View Images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2016**, *41*, 243–246.
- Tumbo, S.D.; Salyani, M.; Whitney, J.D.; Wheaton, T.A.; Miller, W.M. Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume. *Appl. Eng. Agric.* **2002**, *18*, 367–372.
- Turrell, F.M. Growth of the photosynthetic area of citrus. *Bot. Gaz.* **1961**, *122*, 284–298.
- Valença, J., Júlio, E. N. B. S., & Araújo, H. J. (2012). Applications of photogrammetry to structural assessment. *Experimental Techniques*, *36*(5), 71-81.
- Van Pelt, R.; North, M.P. Analyzing canopy structure in Pacific Northwest old-growth forests with a stand-scale crown model. *Northwest Sci.* **1996**, *70*, 15–30.
- Verhoeven, G., Doneus, M., Briese, C., & Vermeulen, F. (2012). Mapping by matching: A computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. *Journal of Archaeological Science*, *39*(7), 2060-2070.
<https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.02.022>.
- Walklate, P.J.; Cross, J.V.; Richardson, G.M.; Murray, R.A.; Baker, D.E. It—Information technology and the human interface: Comparison of different spray volume deposition models using lidar measurements of apple orchards. *Biosyst. Eng.* **2002**, *82*, 253–267.
- Weinmann, M., Weinmann, M., Hinz, S., & Jutzi, B. (2011). Fast and automatic image-based registration of TLS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *66*(6), S62-S70.
- Wells, D., Beck, N., Kleusberg, A., Krakiwsky, E. J., Lachapelle, G., Langley, R. B., & Delikaraoglou, D. (1987). Guide to GPS positioning. In *Canadian GPS Assoc.*

Wernecke, J. *The KML Handbook: Geographic Visualization for the Web*; Pearson Education: 2008

Wheaton, T.A.; Whitney, J.D.; Castle, W.S.; Muraro, R.P.; Browning H.W.; Tucker, D.P.H. Citrus Scion and rootstock, topping height, and tree spacing affect tree size, yield, fruit quality, and economic return. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **1995**, *120*, 861–870.

Whitney, J.D.; Tumbo, S.D.; Miller, W.M.; Wheaton, T.A. *Comparison between Ultrasonic and Manual Measurements of Citrus Tree Canopies*; Paper No. 021052; ASAE: 2002.

Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014). Terrestrial and Close-Range Photogrammetry. *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*.

Wu, C. (2013). Towards linear-time incremental structure from motion. *Proceedings- 2013 International Conference on 3D Vision, 3DV 2013*, 127-134.
<https://doi.org/10.1109/3DV.2013.25>.

Yang, B., Dong, Z., Liang, F., & Liu, Y. (2016). Automatic registration of large-scale urban scene point clouds based on semantic feature points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *113*, 43-58.

Yun, B. Y., & Yoon, W. S. (2018). A Study on the Improvement of Orthophoto Accuracy According to the Flight Photographing Technique and GCP Location Distance in Orthophoto Generation Using UAV. *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, *21*(6), 345-354.

Yu, X.; Hyypä, J.; Kukko, A.; Maltamo, M.; Kaartinen, H. Change detection techniques for canopy height growth measurements using airborne laser scanner data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **2006**, *72*, 1339–1348.

Zaman, Q.U.; Salyani, M. Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurement of citrus tree volume. *Appl. Eng. Agric.* **2004**, *20*, 173.

Zapata-Sierra, A.J.; Manzano-Agugliaro, F. Controlled deficit irrigation for orange trees in Mediterranean countries. *J. Clean. Prod.* **2017**, *162*, 130–140.

CAPÍTULO 8

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

8.1 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Una vez finalizada la elaboración de esta tesis y viendo los resultados obtenidos se abre la posibilidad de iniciar varias líneas de investigación.

En relación con el área de la arqueología, realizar una toma de datos a objetos o piezas encontradas en excavaciones, empleando las diferentes técnicas estudiadas, para poder obtener dichos objetos en 3D y con ello generar un registro digital detallado y preciso. Precisamente al realizar el estudio bibliométrico una de las principales vías de investigación está centrada en el estudio de objetos mediante la fotogrametría de objeto cercano.

En cuanto a lo comentado anteriormente, también sería interesante realizar impresiones 3D de los modelos obtenidos, ya que añadir un nuevo sentido, el del tacto, a la percepción de los elementos estudiados puede mejorar la comprensión de las funcionalidades de los elementos de estudio.

Como se expone en el capítulo 5, se hizo uso de las técnicas empleadas en capítulos anteriores en ámbitos de la ingeniería como es la Agronomía. Se han realizado pruebas en una variedad de cultivo leñoso, como es el naranjo, pero quizás por el lugar de trabajo y por el potencial que tiene en la zona el cultivo del olivo, sería una buena opción extender estos estudios, aplicándolos a dicha especie. El volumen de copa de los árboles es una herramienta esencial para el cálculo o estimación del riego.

Viendo la influencia que tiene la orografía en el solape que se genera en un vuelo UAV, se precisa realizar los cálculos y operaciones oportunas en las aplicaciones de programación de vuelo para subsanar la disminución de solape que se produce cuando la cota del terreno presenta un aumento en relación con la cota de partida.

8.2 PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

En esta tesis se ha publicado el siguiente artículo en revista con índice de impacto como requisito de calidad para la presentación de esta, véase figura 8.1:

Título: Assessing the Orange Tree Crown Volumes Using Google Maps as a Low-Cost Photogrammetric Alternative.

Autores: Carmen Marín-Buzón, Antonio Pérez-Romero, Fabio Tucci-Álvarez, Francisco Manzano-Agugliaro

Revista: AGRONOMY

Volumen y páginas: 10(6): 893

Editorial: MDPI

País: Suiza

Año: 2020

ISSN: 2073-4395

DOI : <https://doi.org/10.3390/agronomy10060893>

Link para la descarga: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/6/893>

Métricas: Journal Citation Reports IF (2018): 2.259

Q1 (19/89) AGRONOMY- SCIE.

Q2 (65/234) PLANT SCIENCE – SCIE.

Scimago Journal Rank SJR 2018: 0.771. Q1 (66/355) Agronomy and Crop Science.

MIAR ICDS 2019: 10.4. Sistemas de evaluación: Directory of Open Access Journals. Visibilidad:

Bases de datos especializadas: Agricultural & Environmental Science Database; CAB Abstracts.

Bases de datos multidisciplinares: Academic Search Premier. Bases de datos de citas: Science

Citation Index Expanded, Scopus.

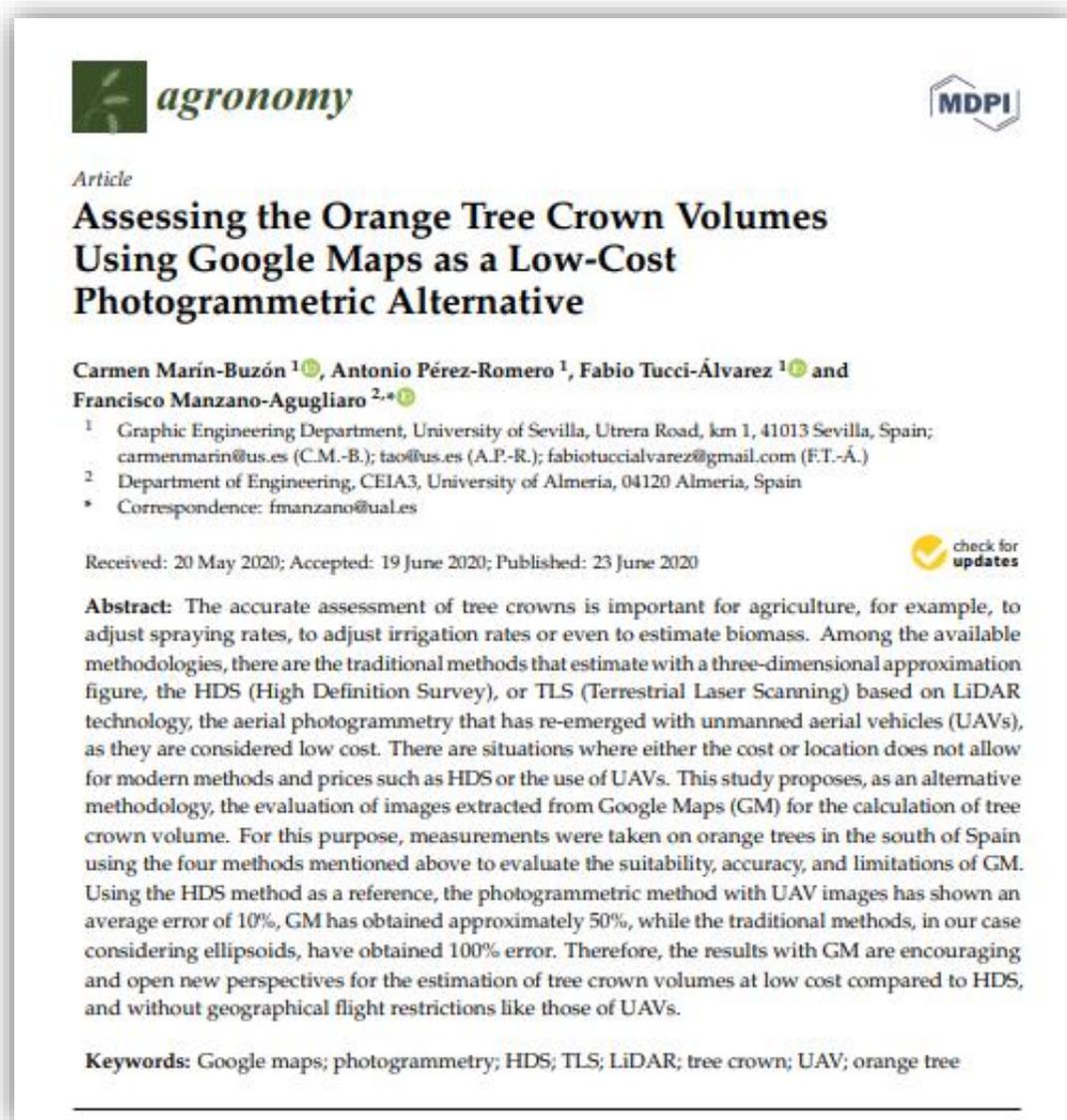


Figura 8.1. Publicación deriva de la tesis.