

3D MODELING OF THE MACARENA WALL (SEVILLE). METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR ITS INTEGRATION IN DIGITAL CARTOGRAPHIC MANAGEMENT STUDIES

MODELADO 3D DE LA MURALLA DE LA MACARENA (SEVILLA). PROPUESTA METODOLÓGICA PARA SU INTEGRACIÓN EN TRABAJOS DE GESTIÓN CARTOGRÁFICA DIGITAL

Elena Cabrera-Revuelta^a, Emilio J. Mascort-Albea^b, Francisco M. Hidalgo-Sánchez^c,
Rocío Romero-Hernández^b, Jacinto Canivell^d

^aDepartment of Mechanical Engineering and Industrial Design, Universidad de Cádiz, Spain. elena.cabrera@uca.es

^bDepartment of Building Structures and Geotechnical Engineering, Universidad de Sevilla, Spain.
emascort@us.es, rocirome@us.es

^cResearch Group TEP-018: Soil Engineering, Universidad de Sevilla, Spain. fmhidalgos@gmail.com

^dDepartment of Architectural Constructions II, Universidad de Sevilla, Spain. jacanivell@us.es

Abstract

Conservation studies of an architectural asset constitute a solid support for future interventions. In particular, Digital Cartographic Management advocates the use of simplified models that allow different levels of definition to be achieved, depending on the desired architectural scale. Based on previous studies in which four levels of definition have been achieved, the aim is to define a fifth level from a 3D model. For this purpose, the Macarena Wall (Seville) is proposed as a case study. In this work, a photogrammetric survey of a section of the sector of this medieval wall is carried out, from which the entities that will form part of a fifth level of definition are identified.

Keywords: Digital photogrammetry; Digital Cartographic Management; Conservation; Medieval wall.

Resumen

Los estudios de conservación sobre un bien arquitectónico constituyen un soporte sólido para futuras intervenciones. En concreto, la Gestión Cartográfica Digital aboga por el uso de modelos simplificados que permiten alcanzar distintos niveles de definición, según la escala arquitectónica deseada. Partiendo de estudios previos en los que se han logrado obtener cuatro niveles de definición, se tiene como objetivo definir un quinto nivel a partir de un modelo 3D. Para ello, se propone como caso de estudio la Muralla de La Macarena (Sevilla). En este trabajo se realiza el levantamiento fotogramétrico de un tramo del sector de esta muralla medieval, a partir del cual se identifican las entidades que formarán parte de un quinto nivel de definición.

Palabras clave: Fotogrametría digital; Gestión Cartográfica Digital; Conservación; Muralla Medieval.

1. INTRODUCTION

Digital Cartographic Management (DCM) is positioned as a validated protocol for the multidisciplinary study of historic buildings, from different scales and degrees of complexity. This protocol is based on the use of simplified models that allow the definition of the architectural scale, facilitating the subsequent use of three-dimensional tools (Canivell et al. 2020)

This work is part of the tasks promoted by the “Specific collaboration agreement between the University of Seville and the Urban Planning Management of the City Council of Seville, for the development of strategies aimed at the restoration and subsequent preventive conservation of the medieval wall of Seville”. This agreement, initiated in 2019, aims to design a comprehensive preventive conservation plan for the preserved sectors of the medieval wall of Seville (Canivell et al. 2019). It should be noted that, within this plan, one of the objectives established is the generation of a digital knowledge model that allows the management of information related to the monument under analysis. Through it, and

based on the DCM strategy, the development of 2D cartographies and 3D models is proposed.

In this way, it is presented the data collection work carried out in the Macarena sector using the photogrammetry technique. Through this data collection it has been generated a three-dimensional model that can be integrated into the knowledge system through the use of Geographic Information Systems (GIS).

1.1 THEWALLOFTHEMACARENA.CURRENTSTATE

The Medieval Wall of Seville (Spain) is a fortification built predominantly with compacted earth stabilized with lime, traditionally called *tapia* or *tapial* (López-Martínez 1999). The predominant material used of these military constructions of Muslim origin is usually a compacted cyclopean concrete made of earth and lime (Martín-del-Río et al. 2008). In the case of the Sevillian wall, most of it is a monolithic construction of superimposed courses or blocks of *tapia*. In some horizontal joints in the walls and towers it can be found decorative courses of fired brick, known as *verdugadas* (See Fig. 1).



Fig. 1. Medieval Wall of Seville (Source: the authors).

The walled set possibly dates back to the Almoravid period, although its exact origin is still disputed (Jiménez-Maqueda & Pérez-Quesada 2012). After the demolitions carried out in the 19th century, only a few isolated parts of the walls remain standing today. Other parts are integrated into the village. The sector that is the subject of this study is the so-called *Muralla de la Macarena*, composed of around 700 linear metres, are currently undergoing comprehensive conservation work.

This sector is composed by a line of the main wall, which conserves the battlements, a total of eight towers, two gates (Macarena and Córdoba) and two gateways, that were built in the 19th century. In addition, a barbican runs parallel along the perimeter, creating an interior corridor known as a *liza*. This parapet wall is smaller than the main wall and is only interrupted by the two gateways, runs parallel to the wall, changing its layout to adapt to the geometry of the eight towers. The gates that delimit the sector at both ends are two: the Macarena gate, built in the 18th century; and the Cordoba gate, the only original Muslim gate that is almost completely conserved in the entire walled set.

The importance and age of the element under study explain why it has been subjected to so many interventions. As a result, it is possible to find different construction solutions. The monument is currently conformed by heterogeneous materials. It can be observed the result of the different interventions, mainly patches made with brick and mortar regarding the oldest ones, while the most recent ones correspond to the conservation interventions carried out in the 1980s (Cabeza-Méndez 1993).

The damage in this sector is mainly due to the interaction with filtration water and capillary rise. The structure sits directly on the pavement, the level of which has been rising, resulting in increased access of humidity to the wall. Although the condition is not critical at present, there is evidence of physical erosion and material decay caused by the crystallisation of soluble salts, mainly in the lower areas. Furthermore, signs of bio-deterioration and dirt, concentrated in the upper parts of the structures can be found (Calama & Canivell 2006).

This current state of physical vulnerability means that the wall is in a diagnostic phase. The studies carried out will be taken into account in a future intervention project.

1.2 STARTING POINT

This work is preceded by a previous study in which DCM has been used to develop two-dimensional models through the use of Geographic Information Systems (GIS). This previous study proposes the design of a terminological standardisation proposal, using GIS for the development of a database to support future interventions.

The spatial organisation of the model is defined by means of a set of basic units of information which, being geographically referenced, present a geometric configuration adaptable to the level of detail required.

The application of these levels provides a clear flexibility in the definition of the elements of the wall, from the urban scale to the architectural detail. This hierarchical system of levels is set out in detail in Canivell et al. 2020, and it is briefly explained below.

Each level of detail is composed of Logical Units of Analysis (LUAs), which correspond to graded levels of accuracy. Four levels of detail -LUA-0 to LUA-3- have been established.

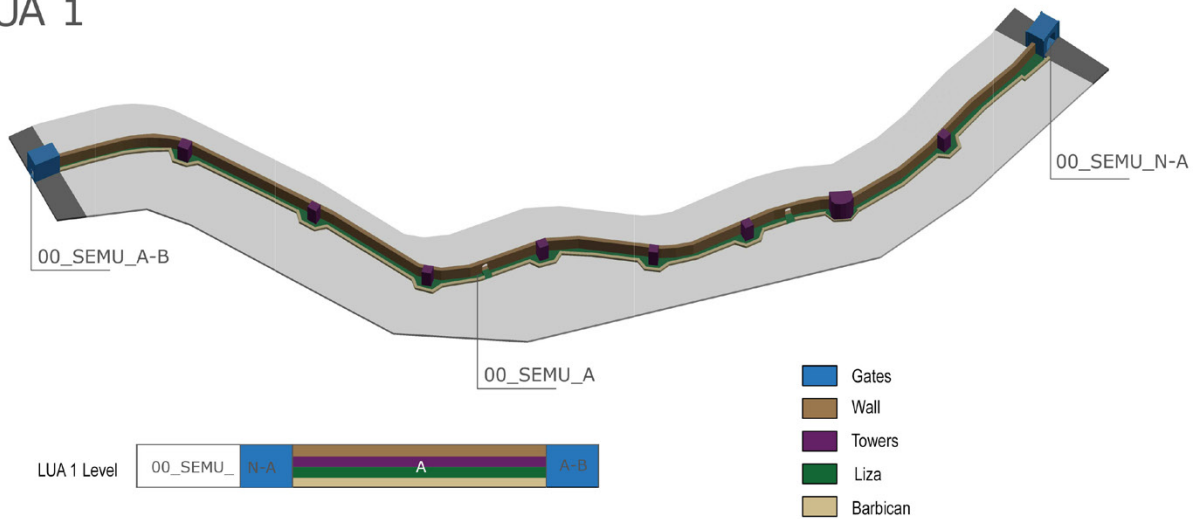
The LUA-0 level encompasses the entire set of the wall. The complete set is encoded as 00_SEMU.

Second, at the LUA-1 level, the gates function as dividing elements. In this way the wall is encoded in sectors: 00_SEMU_A; ... ; 00_SEMU_N. The gates are coded as intermediate elements: 00_SEMU_A-B; ... ; 00_SEMU_N-A.

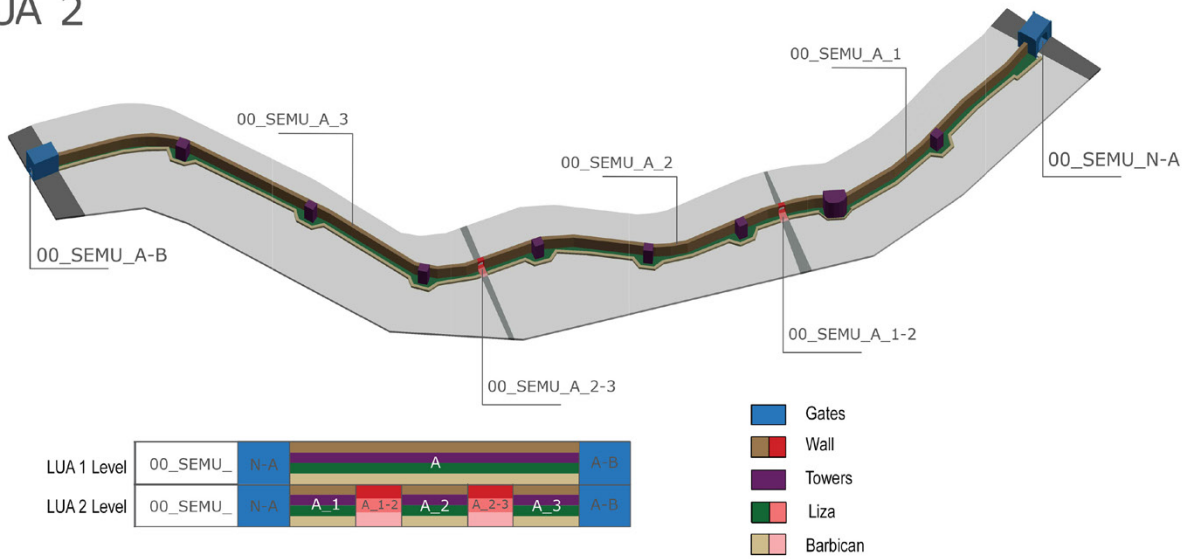
Next, the LUA-2 level establishes a subdivision marked by the gateways. Taking sector 00_SEMU_A as an example, it is divided into three parts: 00_SEMU_A_1, 00_SEMU_A_2 and 00_SEMU_A_3. The gateways are coded as intermediate elements in the following way: 00_SEMU_A_1-2 and 00_SEMU_A_2-3.

Finally, at the level of detail LUA-3, the element that works as a delimiter is the tower. As can be seen, in the section 00_SEMU_A_1 there are two towers; in 00_SEMU_A_2 there are three more; and in the section 00_SEMU_A_3 there are three more towers. To exemplify, the section 00_SEMU_A_1 (LUA-2) is taken as a reference, which is divided into 00_SEMU_A_1, 00_SEMU_A_2 and 00_SEMU_A_3. The towers function as intermediate elements, so they are encoded as 00_SEMU_A_1-2 and 00_SEMU_A_2-3.

LUA 1



LUA 2



LUA 3

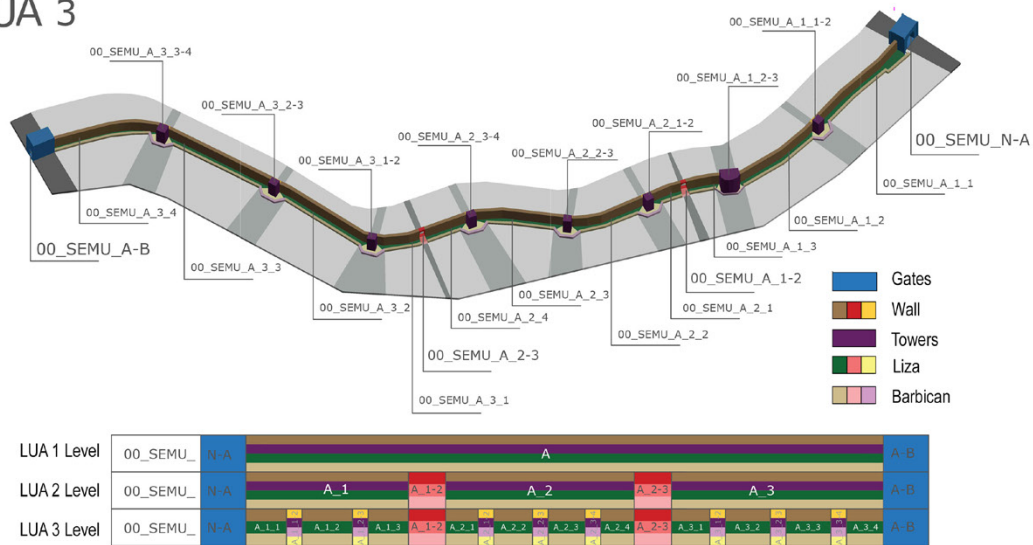


Fig. 2. Scheme of the different levels LUA-1-, LUA-2- and LUA-3- (Source: based on (Canivell et al. 2020)).

Furthermore, the following elements can be identified from level LUA-1 onwards: gate, wall, towers, liza and barbican. Both the wall and the barbican are also divided into three sections: inner face, outer face, and upper face. The proposed model codes each of these elements according to the level of detail.

For a better understanding of the different levels referred to, it has been made an adaptation of the scheme that can be found at Canivell et al. 2020 (See Fig. 2). Two-dimensional models used at different levels of architectural detail can support further development into three-dimensional models (Hidalgo-Sánchez 2018; Mascort-Albea et al. 2020), through 3D geospatial platforms or the use of BIM.

In order to advance to the fifth level, LUA-5, it is necessary to have the support of a three-dimensional model, with a higher level of detail. It is proposed to obtain this model using digital photogrammetry. This studio has been made in parallel with the previous LUAs definition.

1.3 USE OF DIGITAL PHOTOGRAMMETRY AS AN ACQUISITION TECHNIQUE

Technology plays a fundamental role in the safeguarding of cultural heritage, providing new multidisciplinary methods that contribute to improving conservation tasks (Merchán & Pérez 2020). The conservation and enhancement of cultural heritage has improved substantially since the development of digital technologies, such as digital photogrammetry and the use of laser scanners (Sequenzia et al. 2021). In addition to these two techniques, there is a more recent one, known as Mobile Mapping Systems (MMS), based on SLAM technology (Simultaneous Localisation and Mapping) (Benavides-López & Barrera-Vera, 2020). Complementary use of these techniques is common (Alshawabkeh et al. 2020).

The use of 3D models has become an essential medium for interaction and visualisation of virtual replicas (Quattrini et al. 2020). However, digital tools, capable of generating highly detailed three-dimensional models, also imply a high level of dedication in terms of human and material resources (Canivell et al. 2020). It is therefore necessary to implement new protocols that take advantage of the possibilities offered by current digital technologies for a better knowledge of the built heritage (Masciotta et al. 2019).

For the development of this work, photogrammetry technique has been chosen for the data acquisition. The main advantage of this technique over the use of laser scanners is its portability, low cost and the quality of the obtained textures (Henriques et al. 2020). Thanks to the advances in computer vision techniques, algorithms based on image processing have become more competitive for cloud of points generation. In particular, the Structure from Motion (SfM) algorithm, applied in digital photogrammetry, is the most robust and accurate acquisition technique, applicable also to large-scale objects (Pierdicca 2018). Some parts of this wall have been previously registered with close-range photogrammetric techniques and laser scanner (Barrera et al. 2005; Barrera-Vera 2005), with the limitations that the technology had in 2005.

An exhaustive survey allows detailed studies of interest for management, conservation and intervention.

2. OBJETIVES

The case study developed in this work is a relatively complex construction of great extension. Therefore, the main objective of this work is to establish a methodology for the geometrical data acquisition and subsequent post-processing that can be applied to the entire length of the wall. In order to establish this methodology, the work focuses on a determined part of the wall that will be taken as a sample, since it contains all the main elements: a gateway and a tower, and also a part of wall, liza and barbican (See Fig. 3). In terms of the LUA-3- this work encompasses the entities 00_SEMU_A_1-2, 00_SEMU_A_2_1 and 00_SEMU_2_1-2.

On the other hand, the aim is also to obtain a highly accurate photogrammetric model to detail the current state of the wall, and that can serve as a graphic document.

In addition, the integration of this photogrammetric model obtained as a working tool within the DCM explained above is also planned.

3. METHODOLOGY

3.1 PLANNING

As can be seen in Fig. 4, what is commonly referred to as "wall" is in fact a set of vertical walls, among

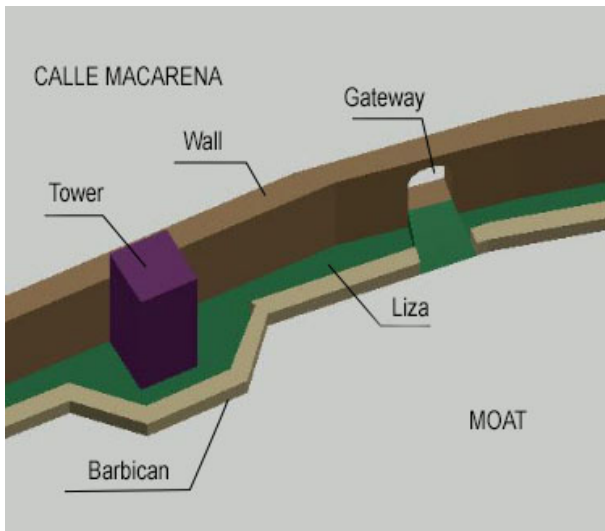


Fig. 3. Section of the wall on which the survey is carried out (Source: the authors).

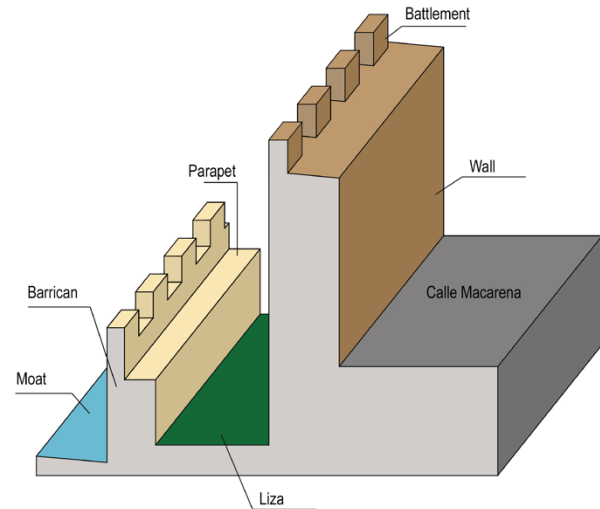


Fig. 4. Diagram of the parts that conform the wall (Source: the authors).

which two main elements can be distinguished: the barbican and the wall itself. In addition, there are other elements such as towers and gateways, which can be found intermittently along the wall.

For a complete recording of the geometry of the section under study, all the faces that compose the different elements must be considered. Elements such as the parapet and the battlements crowning, the barbican and the wall respectively must be taken into consideration.

The sides of the barbican and the wall facing the liza are considered to be inner sides: inner barbican and inner wall. The opposed sides are therefore considered to be outer sides.

Having said that, it is possible to differentiate between a considerable number of different parts to be recorded (inner wall, outer wall, inner barbican, outer barbican, among others). For this reason, the photogrammetric data collection has been planned as a series of independent works, which will later be joined together.

The following data collections are planned:

- Shot 1: from the moat to record the outer barbican, part of the inner wall (including the gateway) and part of the tower.
- Shot 2: from the liza to record the inner barbican and the parapet.
- Shot 3: from the liza to record the inner wall, the battlement and part of the tower.

- Shot 4: from *Calle Macarena* to record the outer wall (including the gateway), part of the tower and the battlement.

The planning step is vital for the success of this kind of surveys. It is important to pay attention to some considerations such as the maximum distance from which the pictures have to be taken in order to acquire the desired resolution (Cabrera-Revuelta & Molero-Alonso, 2016).

To make it possible to join the different data collection a topographic support network is used. In this way, the clouds of points that will be obtained in the subsequent processing will be referenced to the same XYZ coordinate system. For this purpose, the execution of an itinerary using a total station is proposed. In this step it is important to optimize the number of positions of the total station, selecting the best set of points of view that provide a complete visualization of the required geometry (Cabrera-Revuelta et al. 2021).

3.2 MATERIALS

Data collection is executed using the materials detailed below.

A total station Leica TS02, a tripod and a tape measure were used for the survey tasks. It was necessary to use a reflective prism to connect stations.

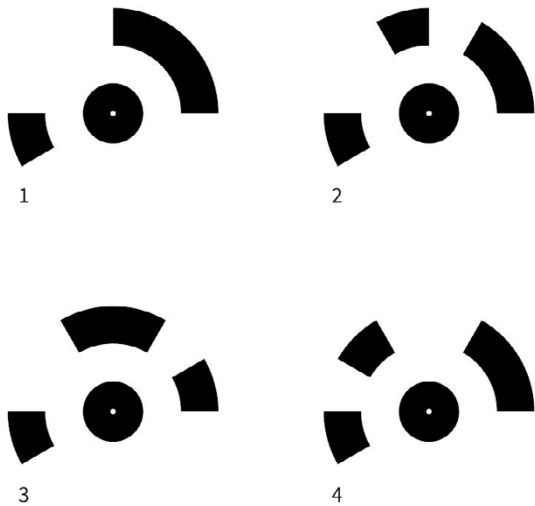


Fig. 5. Coded targets of 12-bit generated with Agisoft Metashape (Source: Agisoft Metashape).

A SONY ILCE 6000 camera with a fixed lens of 16 mm (equivalent to 24 mm lenses on full-frame camera bodies) was used to take the photographs. It was also necessary to use a telescopic pole, as well as a remote-controlled shutter release.

In addition, 12-bit coded targets were printed using the *Agisoft Metashape* software (see Fig. 5) to use them as control points. The printing has been done on a resistant paper. These control points are the link between the topographic data and the photogrammetric data.

3.3 METHODS

First, the coded targets were placed along the different sides of the wall: the outer and the inner barbican and the inner and the outer wall. The targets were placed at different heights, equally distributed. A total of 46 coded targets were used, in combination with other natural targets located on elements external to the architectural site, such as traffic signals or signs on nearby buildings.

The stationing network is planned as follows. A first station (E1) is located in the moat. This first station covers a wide field of view, acquiring the coordinates of many control points. Then, an intermediate stationing (E2) is carried out enabling to connect with the interior of the liza and with *Calle Macarena*. The third station (E3) is therefore located inside the liza. Thanks to this one it is possible to obtain the coordinates of the

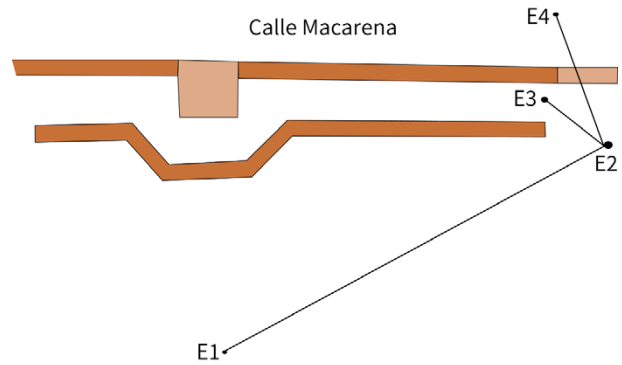


Fig. 6. Sketch of the stationing network (Source: the authors).

control points on the inner sides of the barbican and the wall. Finally, through the gateway, a fourth station in *Calle Macarena* (E4) can be identified. This last station will register the control points placed along the outer wall (see Fig. 6).

In the first station, a coordinate system was created by angle orientation. The next three stations were connected using the “orientation by coordinates” option. This option requires registering the coordinates of the next station as well as the coordinates of at least two other points that were visible from the next station. The use of a reflective prism was necessary, as well as the registration of points located on elements external to the wall (Fig. 7).

For the reading of the coded targets, it has been taken care to assign to each point the number printed on each marker. This will be very useful for the posterior processing of the data.

Secondly, in order to take the photographs, different sweeps were made along the length of each side. The overlap between images higher than 70%, and whenever possible, the coded targets were photographed (see Fig. 8).

To take the geometry of the battlement it was necessary to use a pole (see Fig. 9). The camera was placed on the pole, and through the mobile application of the camera, it was possible to preview the image and take the shot with remote control from a mobile device.

Due to the extension of the element, the incidence of the sun lighting during data collection has played an important role. It is usual that the fieldwork for architectural sites can take place



Fig. 7. Position of the second station, with visibility to the interior of the liza and to *Calle Macarena* (Source: the authors).



Fig. 8. Photograph of part of the outer barbican where some coded targets can be seen (Source: the authors).



Fig. 9. Photo-shot of the battlement using a pole (Source: the authors).

over long working sessions. This fact, together with the immovable nature of the wall, means that there is an inevitable variation in lighting conditions. Added to this is considered the fact that each wall has a different orientation.

Data collection began by recording photos of the shaded parts. Subsequently, in the late afternoon, it was completed with the recording of the areas that had been most exposed to the sun. A total of 619 images were taken.

The use of coded targets makes the post-process with the software to place very efficient. The software automatically identifies the position of these targets on the images and assigns them the corresponding name. This saves a lot of time and, specially, allows to control the accuracy of the geometry obtained by the SfM algorithm. Next, the XYZ coordinates of each marker must be imported. The work will be even more efficient if the name of a point corresponding to the read target has been assigned during the data acquisition process (See Fig. 10).

The post-processing work was performed with the *Agisoft Metashape* software. For this purpose, separate sub-processing jobs were carried out.

Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Accuracy (m)	Error (m)
✓ target 1	985.348500	984.494900	101.901000	0.005000	0.003821
✓ target 2	982.758200	985.420900	100.920600	0.005000	0.008811
✓ target 3	991.059900	980.572300	103.948400	0.005000	0.039490
✓ target 4	993.654900	979.709000	103.401100	0.005000	0.041228
✓ target 6	988.434900	981.467300	103.449300	0.005000	0.044310
✓ target 7	991.699900	989.473400	100.902900	0.005000	0.035872

Fig. 10. XYZ coordinates of the control points read with the total station (Source: the authors).

These sub-jobs are called *chunks*. Specifically, six chunks were needed, which were easily joined together as they were all referenced to a common coordinate system (See Fig. 11 and Fig. 12).

It was necessary to draw masks on the photographs to remove disturbing elements, such as vegetation, sky, or elements that could generate noise.

Each chunk was processed separately, obtaining the dense clouds of points. Once the different chunks have been aligned based on the markers, a complete and scaled dense cloud of points of about 39 million points is obtained (See Fig. 13).

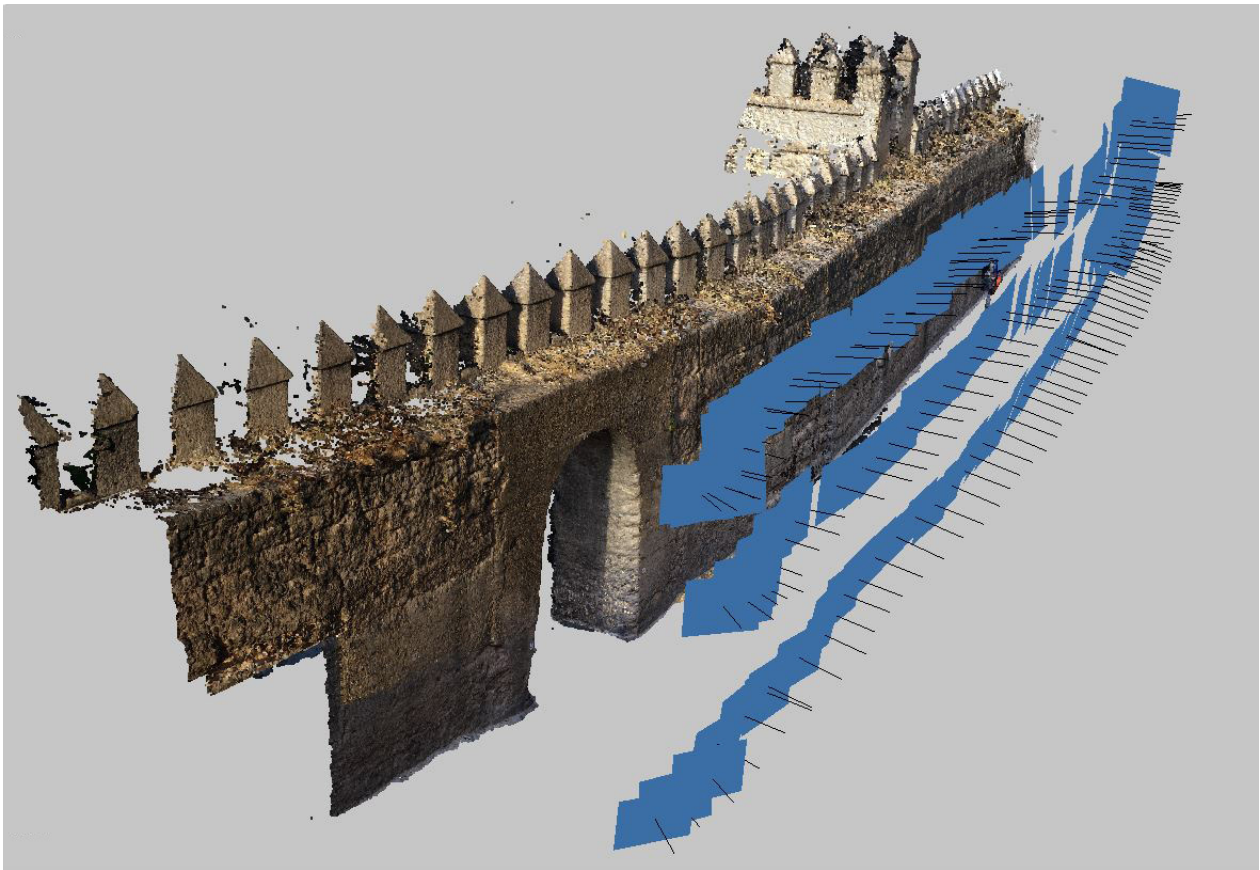


Fig. 11. Chunk of the outer wall (Source: the authors).

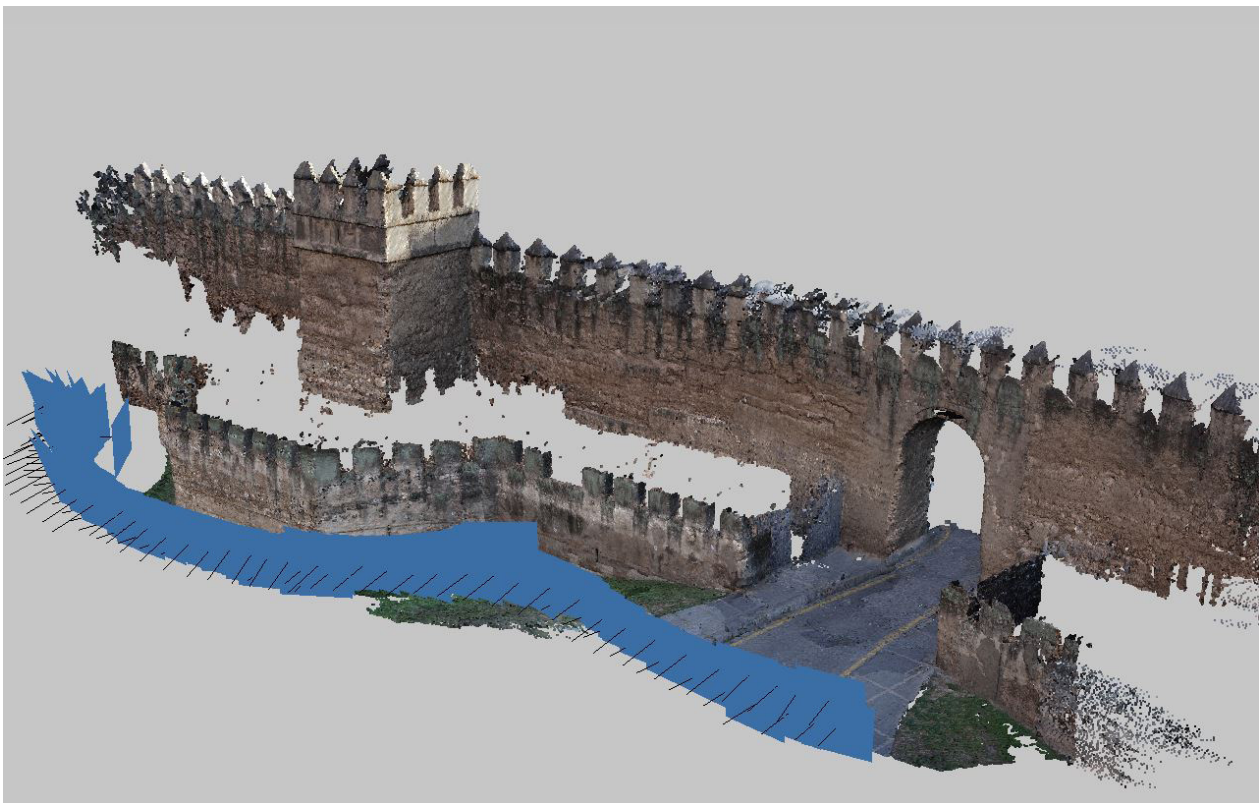


Fig. 12. Chunk of the outer barbican and part of the inner wall (Source: the authors).

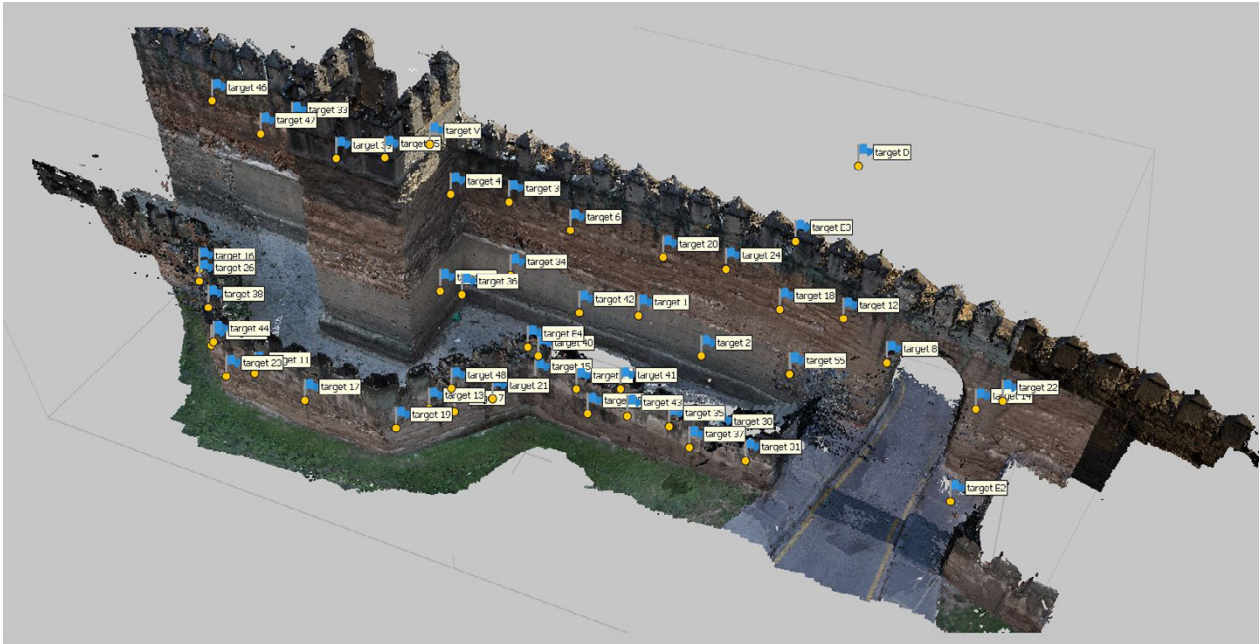


Fig. 13. Full dense cloud of points showing markers (Source: the authors).



Fig. 14. Orthophoto of the principal view (Source: the authors).

4. RESULTS

The dense cloud of point obtained from photogrammetry has been used to create a first approximation of the LUA-4 level.

From the dense cloud of points it has also been possible to build a textured mesh, from which orthoimages can be exported (See Fig. 14).

The “Draw polyline” tool, included in Agisoft Metashape, was used to export the main shapes of the model obtained (See Fig. 15). This information

was imported to CAD software in order to create a simplified 3D model.

From this data, a simplified 3D model has been obtained in which the entities that compose the level of definition LUA-4 are identified.

As can be seen in Fig. 16, the transition from level LUA-3 to LUA-4 involves the segmentation of the wall, the barbican and the liza. It is proposed to divide these elements into sections comprising between 5 and 6 battlements.



Fig. 15. Definition of main shapes with the “Draw polyline” tool (Source: the authors).

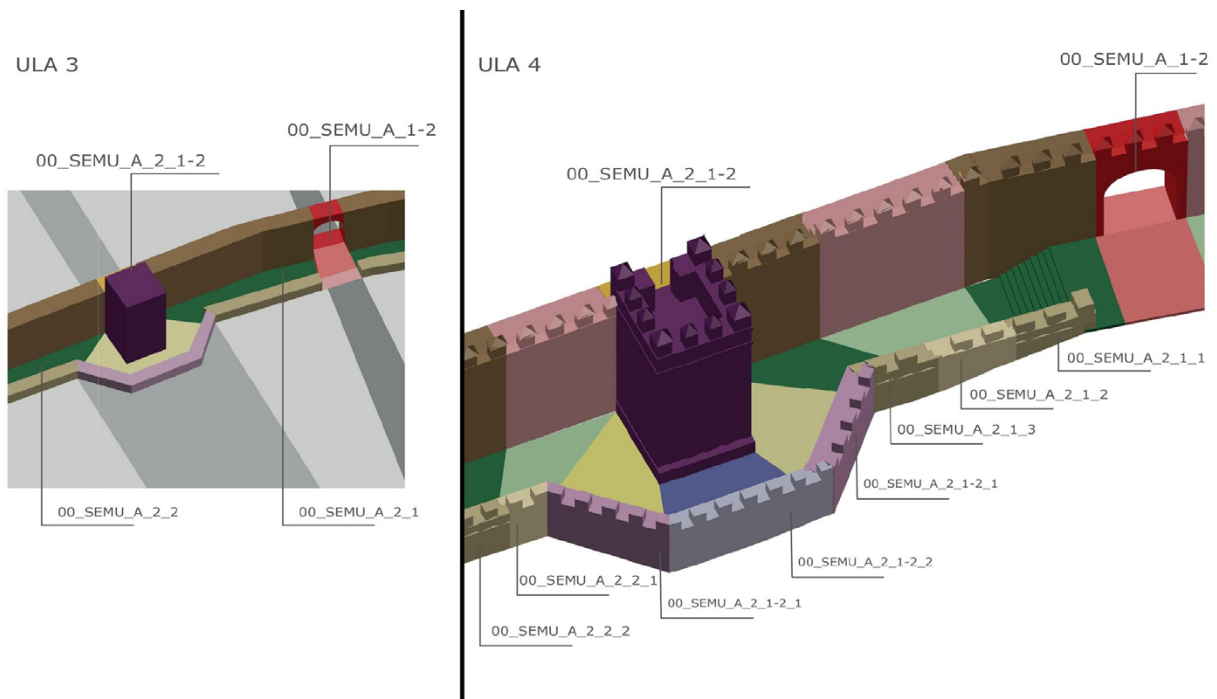


Fig. 16. Proposed division of elements at LUA-4-level.

5. CONCLUSIONS

The use of two-dimensional data models is still effective for certain purposes. However, the inclusion of the third dimension offers a range of possibilities that would be difficult to embrace

from other methodological approaches. Beyond the obvious improvements in visualisation, it is worth highlighting that the third dimension enables analyses that consider new spatial attributes of the architecture itself and its surroundings.

In this case, the cloud of points obtained, in combination with the data structure established by the DCM, constitutes a useful information base for the elaboration of a three-dimensional model with associated information.

One of the fundamental tasks when approaching the construction of this type of 3D models is the schematization and division of the structure into different conforming parts. This type of sectorisation, on the one hand, facilitates its geometric modelling, and on the other hand, enables an individualised and multi-scale connection of the information to each part of the ensemble. This model can be used both to record the geometry of the object with adequate precision and as a support for consultation (Angulo et al. 2017; Rubio et al. 2018).

The methodology established in this research corresponds adequately to this aim. Thus, the results obtained, both geometrically and semantically, open the door to the construction of a three-dimensional data model. The latter is established as a clear line of future work, in which the use of 3D GIS tools and the development of HBIM models are possible.

This type of model could become a powerful digital tool for predictive maintenance, preventive conservation, and the dissemination of the main values of the medieval wall of Seville.

In this line, similar contributions based on BIM methodology can be found, such as the H2020-Inception project (Piaia et al. 2020) or GIS, as the European Project ResCult (Increasing Resilience of Cultural Heritage) (Chiabrande et al. 2018).

To this end, the methodology established can be extended to the rest of the sections of the

wall, making it possible to obtain illustrative, assessable, and comparable data on the whole and its conforming parts.

Finally, regarding the results included in this work, the cloud of points obtained has a high level of detail.

This cloud of points is also a very valuable documentation that makes it possible to evaluate the current state of the wall, and it can be compared with data collected in the future.

To conclude, this work can show how the photogrammetric technique has evolved during the last two decades. It is possible comparing the results here obtained with the previous works carried out along the same site (Barrera et al. 2005; Barrera-Vera, 2005). Nowadays, photogrammetry techniques are able to provide a detailed and quality-textured model that furthermore can be easily interchangeable between different experts and non-experts. This fact was not always possible. As can be seen in the works aforementioned, the model had to be fragmented and remodelled. In those old works, to supply the lack of detail it was necessary to carry out a lighting study to provide a good visualization of the model.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their gratitude to the Urban Planning Department of the Seville City Council, especially to the Urban Conservation and Building Renovation Service, the Urban Planning and Development Service and the Spatial Data Infrastructure of Seville (IDE Seville).

REFERENCES

- Alshawabkeh, Y., El-Khalili, M., Almasri, E., Bala'awi, F., & Al-Massarweh, A. 2020. Heritage documentation using laser scanner and photogrammetry. The case study of Qasr Al-Abidit, Jordan. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 16, e00133. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00133>
- Angulo, R., Pinto, F., Rodríguez, J., & Palomino, A. 2017. Digital Anastylis of the Remains of a Portal by Master Builder Hernán Ruiz: Knowledge Strategies, Methods and Modelling Results. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 7 (March), pp. 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.09.003>
- Barrera, J.A., Macías, D.H., & Boquera, J.H. 2005. La muralla almohade de Sevilla: aplicación de tecnologías de vanguardia a los levantamientos en arqueología y restauración. *Aparejadores: Boletín Del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla*, no. 69, p. 48.
- Barrera Vera, J.A. 2005. *Generation of virtual models of historical tapial 1 walls in Seville (Spain)*.

- Benavides López, J.A., & Barrera Vera, J A. 2020. Evaluación de los Sistemas de Mapeo Móvil (MMS) en la documentación gráfica del tholo de El Romeral (Conjunto Arqueológico Dólmenes de Antequera). *Arqueología de la Arquitectura*, vol. 17, e095. <https://doi.org/10.3989/arq.arqt.2020.004>
- Cabeza Méndez, J.M. 1993. Restauración de la murallas de Sevilla. *Arquitectura y Ciudad II y III : Seminarios celebrados en Melilla, los días 25, 26 y 27 de septiembre de 1990 y los días 24, 25 y 26 de septiembre de 1991*, pp. 341–348.
- Cabrera-Revuelta, E., & Molero-Alonso, B. 2016. Fotogrametría terrestre. Trabajos previos a la toma de datos. *EGE Revista de Expresión Gráfica en la Edificación*, no. 9, pp. 33–44. <https://doi.org/10.4995/ege.2016.12458>
- Cabrera-Revuelta, E., Chávez, M.J., Barrera-Vera, J.A., Fernández-Rodríguez, Y., & Caballero-Sánchez, M. 2021. Optimization of laser scanner positioning networks for architectural surveys through the design of genetic algorithms. *Measurement*, vol. 174, 108898. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108898>
- Calama, J.M., & Canivell, J. 2006. Análisis patológico de los paramentos de la muralla almohade de Sevilla (tramo comprendido entre la Puerta de la Macarena y el Jardín del Valle). V SIACOT. I SAACT. *Construir con Tierra. Ayer y Hoy. Libro de Resúmenes*. 14–17 June 2006, Mendoza, Argentina, pp. 117–118.
- Canivell, J., Jaramillo-Morilla, A., Mascort-Albea, E.J., & Romero-Hernández, R. 2019. Metodología de evaluación y monitorización del patrimonio basado en la gestión cartográfica digital. La muralla de Sevilla. In M.D. Sivo, D. Ladiana (Ed.), *Le Mura Urbane Crollano: Conservazione e Manutenzione Programmata Della Cinta Muraria Dei Centri Storici: Atti del Seminario Internazionale*. (pp. 119-135). Pisa: Pisa university press. <https://hdl.handle.net/11441/88061>
- Canivell, J., Mascort-Albea, E.J., Cabrera-Revuelta, E., Romero-Hernández, R., Jaramillo-Morilla, A., & Serrano-Chacón, Á. 2020. A methodological framework for the preventive conservation of historic walls located in urban contexts. Spatial data standards for the medieval wall of Seville (Spain): the case of the Macarena sector. *Ge-Conservacion*, vol. 18, no. 1, pp. 44–55. <https://doi.org/10.37558/gec.v18i1.762>
- Chiabrando, F., Colucci, E., Lingua, A., Matrone, F., Noardo, F., & Spanò, A. 2018. A European Interoperable Database (EID) to increase resilience of cultural heritage. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 42, no. 3/W4, pp. 151–158. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-151-2018>
- Henriques, F., Bailão, A., Rocha, J., & Costa, J. 2020. Restoration of an 18th century frame: 3D modelling, printing and matching color of decorative flowers elements. *Ge-Conservacion*, vol. 18, no. 1, pp. 313–322. <https://doi.org/10.37558/gec.v18i1.854>
- Hidalgo-Sánchez, F.M. 2018. *Interoperatividad entre SIG y BIM aplicada al patrimonio arquitectónico, exploración de posibilidades mediante la realización de un modelo digitalizado de la Antigua Iglesia de Santa Lucía y posterior análisis*. Final Degree Work. Universidad de Sevilla, Sevilla. <https://hdl.handle.net/11441/79394>
- Jiménez-Maqueda, D., & Pérez-Quesada, P. 2012. La muralla huérfana. A vueltas con el último recinto amurallado de Madnat Išblia. *Romula*, no. 11, pp. 273–347.
- López-Martínez, F.J. 1999. Tapias y tapiales. *Loggia: Arquitectura y Restauración*, no. 8, pp. 74–89. <https://doi.org/10.4995/loggia.1999.5288>
- Martín-del-Río, J.J., Alexandre, F.J., Blasco-López, F.J., & Márquez-Martínez, G. 2008. Hormigones de cal islámicos: altas resistencias en los tapiales del sector oriental de la Muralla de Sevilla (España). *Actas de IX CICOP 2008. Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. Patrimonio Construido e Innovación., Sevilla*, vol. I, pp. 81–86.

Masciotta, M.G., Morais, M.J., Ramos, L.F., Oliveira, D.V, Sánchez-Aparicio, L.J., & González-Aguilera, D. 2019. A Digital-based Integrated Methodology for the Preventive Conservation of Cultural Heritage: The Experience of HeritageCare Project. *International Journal of Architectural Heritage*, pp. 1–20. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1668985>

Mascort-Albea, E.J., Jaramillo-Morilla, A., Romero-Hernández, R., & Hidalgo-Sánchez, F.M. 2020. BIM-GIS interoperability applied to architectonic heritage: 2D and 3D digital models for the study of the ancient church of Santa Lucía in Seville (Spain). *Science and Digital Technology for Cultural Heritage: Interdisciplinary Approach to Diagnosis, Vulnerability, Risk Assessment and Graphic Information Models*, CRC Press. pp. 31–35. <https://doi.org/10.1201/9780429345470-5>

Merchán, M.J., & Pérez, E. 2020. Conservation to overcome oblivion. New methods for the survival of lost heritage memory. *Ge-Conservacion*, no. 17, pp. 160–170. <https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.753>

Piaia, E., Maietti, F., Di Giulio, R., Schippers-Trifan, O., Van Delft, A., Bruinenberg, S., & Olivadese, R. 2020. BIM-based cultural heritage asset management tool. Innovative solution to orient the preservation and valorization of historic buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1734686>

Pierdicca, R. 2018. Mapping Chimú's settlements for conservation purposes using UAV and close range photogrammetry. The virtual reconstruction of Palacio Tschudi, Chan Chan, Peru. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 8, pp. 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.11.004>

Quattrini, R., Pierdicca, R., Paolanti, M., Clini, P., Nespeca, R., & Frontoni, E. 2020. Digital interaction with 3D archaeological artefacts: evaluating user's behaviours at different representation scales. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 18, e00148. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00148>

Rubio, J.M., Martín, J.J.F., & Alonso, J.I.S.J. 2018. Implementation of 3D scanner and digital photogrammetry in the documentation process of *la Merced Church*, Panama. *EGA Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*, vol. 23, no. 32, pp. 208–219. <https://doi.org/10.4995/ega.2018.9811>

Sequenzia, G., Fatuzzo, G., & Oliveri, S.M. 2021. A computer-based method to reproduce and analyse ancient series-produced moulded artefacts. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 20, e00174. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2021.e00174>

How to cite this article: Cabrera-Revuelta, E., Mascort-Albea, E.J., Hidalgo-Sánchez, F.M., Romero-Hernández, R., Canivell, J. 2021. "3D Modeling of the Macarena wall (Seville). Methodological proposal for its integration in digital cartographic management studies.", *EGE Revista de Expresión Gráfica en la Edificación*, No. 14, Valencia: Universitat Politècnica de València. pp. 4-23. <https://doi.org/10.4995/ege.2021.15584>

MODELIZADO 3D DE LA MURALLA DE LA MACARENA (SEVILLA). PROPUESTA METODOLÓGICA PARA SU INTEGRACIÓN EN TRABAJOS DE GESTIÓN CARTOGRÁFICA DIGITAL.

1. INTRODUCCIÓN

La Gestión Cartográfica Digital (GCD) se posiciona como un protocolo validado para el estudio multidisciplinar de inmuebles históricos, a partir de diferentes escalas y grados de complejidad. Este protocolo se basa en el uso de modelos simplificados que permiten alcanzar la definición de la escala arquitectónica, facilitando el posterior uso de herramientas tridimensionales (Canivell et al. 2020).

El presente trabajo se enmarca en las tareas impulsadas por el “Convenio específico de colaboración entre la Universidad de Sevilla y la Gerencia de Urbanismo del Ayuntamiento de Sevilla, para el desarrollo de estrategias encaminadas a la restauración y su posterior conservación preventiva de la muralla medieval de Sevilla”. En dicho convenio, iniciado en el año 2019, se persigue el diseño de un plan de conservación preventiva de carácter integral para los sectores conservados de la muralla medieval de Sevilla (Canivell et al. 2019). Cabe destacar que, dentro de este plan, uno de los objetivos establecidos es la generación de un modelo digital de conocimiento que permita gestionar la información relativa al monumento analizado. A través del mismo, y en base a la referida estrategia GCD, se plantea el desarrollo de cartografías 2D y de modelos 3D.

De este modo, se presentan a continuación los trabajos de toma de datos mediante el uso de la técnica de la fotogrametría que se realizaron en el sector de la Macarena, con objeto de la generación de un modelo tridimensional integrable en el sistema de conocimiento planteado a través del uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

1.1 LA MURALLA DE LA MACARENA. ESTADO ACTUAL

La Muralla Medieval de Sevilla (España), es una fortificación construida prevalentemente con tierra compactada estabilizada con cal, tradicionalmente denominado tapia o tapial (López-Martínez 1999). El material predominante en estas construcciones militares de origen musulmán es normalmente un hormigón ciclópeo compactado de tierra y cal (Martín-del-Río et al. 2008). En el caso de la muralla sevillana la mayor parte es una construcción monolítica de hiladas o cajones de tapia superpuestos que en algunas juntas horizontales en lienzos y torres presentan hiladas decorativas de ladrillo cocido, denominadas verdugadas (Véase Fig. 1).

El recinto amurallado data posiblemente de época almorávide, aunque su origen exacto es aún discutido (Jiménez-Maqueda y Pérez-Quesada 2012). Tras las demoliciones llevadas a cabo en el siglo XIX,

actualmente solo quedan en pie algunos tramos aislados y otros integrados dentro del caserío. El sector del que es objeto este estudio es el denominado como Muralla de la Macarena, del que se conservan unos 700 metros lineales y que actualmente está siendo objeto de una intervención integral de conservación.

Este sector se compone por un lienzo de muralla principal, que conserva su almenado, un total de ocho torres, así como dos puertas (de la Macarena y de Córdoba) y dos portillos practicados en el siglo XIX. Asimismo, una barbacana recorre el mismo perímetro mencionado, generando un pasillo interior denominado liza. Este antemuro, de menor tamaño que el lienzo principal, solo interrumpido en los dos portillos, discurre en paralelo a la muralla, cambiando su disposición para adaptarse a la geometría de las ocho torres. Las puertas delimitan en los extremos el sector, siendo la de la Macarena levantada en el siglo XVIII y la de Córdoba, la única puerta original musulmana que se conserva casi por completo en todo el recinto amurallado.

La importancia y antigüedad del elemento objeto de estudio explican que éste haya sido sometido a numerosas intervenciones. Por ello, se pueden encontrar soluciones constructivas diversas. Actualmente el monumento está compuesto por materiales heterogéneos, fruto de las distintas intervenciones, principalmente parcheados realizados con ladrillo y morteros las más antiguas, siendo de restituciones de tapia a una cara las más actuales que corresponden a las intervenciones de conservación realizadas a partir de la década de los 80 (Cabeza-Méndez 1993).

Las lesiones que presenta este sector derivan principalmente de la interacción con el agua de filtración y de la ascensión capilar, ya que las estructuras se asientan directamente en el firme, cuya cota ha ido elevándose, repercutiendo en un incremento del acceso de la humedad al muro. Aunque el estado no es actualmente crítico, se evidencian erosiones físicas y descohesiones de material originadas por la cristalización de sales solubles, principalmente en las zonas bajas, además de síntomas de biodeterioro y suciedad, concentradas en las partes altas de las estructuras (Calama y Canivell 2006). Este actual estado de vulnerabilidad física hace que la muralla se encuentre en fase de diagnóstico. Los estudios realizados se tendrán en cuenta en un futuro proyecto de intervención.

1.2 PUNTO DE PARTIDA

Este trabajo está precedido por un estudio previo en el cual se ha utilizado la GCD para elaborar modelos bidimensionales a través del uso de Sistemas de

Información Geográfica (SIG). En dicho estudio previo se plantea el diseño de una propuesta de normalización terminológica, a través del uso de SIG para el desarrollo de una base de datos que dé soporte a futuras intervenciones.

La organización espacial del modelo se define mediante un conjunto de unidades básicas de información que, encontrándose geográficamente referenciadas, presentan una configuración geométrica adaptable al nivel de detalle requerido.

La aplicación de estos niveles aporta una clara flexibilidad en la definición de los elementos de la muralla, desde la escala urbana hasta el detalle arquitectónico. Este sistema jerárquico de niveles se explica de forma resumida a continuación, y se puede encontrar de forma pormenorizada Canivell et al. 2020.

Cada nivel de detalle se compone de Unidades Lógicas de Análisis (ULA), que corresponden a niveles de precisión graduales.

Se han establecido cuatro niveles de detalle -ULA-0 a ULA-3-.

El nivel ULA-0 engloba el conjunto total de la muralla. El conjunto completo es codificado como 00_SEMU.

En segundo lugar, en el nivel ULA-1, las puertas funcionan como elementos divisorios. De esta forma la muralla queda codificada en sectores: 00_SEMU_A; ... ; 00_SEMU_N. Las puertas son codificadas como elementos intermedios: 00_SEMU_A-B; ... ; 00_SEMU_N-A.

A continuación, el nivel ULA-2 establece una subdivisión marcada por los pórticos. Tomando como ejemplo el sector 00_SEMU_A, éste queda dividido en tres partes: 00_SEMU_A_1, 00_SEMU_A_2 y 00_SEMU_A_3. Los pórticos son codificados como elementos intermedios de la siguiente forma: 00_SEMU_A_1-2 y 00_SEMU_A_2-3.

Por último, en el nivel de detalle ULA-3 el elemento que funciona como delimitador es la torre. Como puede observarse, en el tramo 00_SEMU_A_1 existen dos torres; en 00_SEMU_A_2 hay tres más; y en el tramo 00_SEMU_A_3 se hallan otras tres torres más. Para ejemplificar, se toma como referencia el tramo 00_SEMU_A_1, el cual queda dividido en 00_SEMU_A_1, 00_SEMU_A_2 y 00_SEMU_A_3. A su vez, las torres funcionan como elementos intermedios, por lo que se codifican como 00_SEMU_A_1-2 y 00_SEMU_A_2-3.

A su vez, a partir del nivel ULA-1 se pueden identificar los siguientes elementos: puerta, muralla, torres, liza y barbacana. Tanto la muralla como la barbacana también son divididas en tres paños: cara interna, cara externa y cara superior. El modelo propuesto codifica cada uno de estos elementos según el nivel de detalle en el que se esté.

Para una mejor comprensión de los distintos niveles a los que se hace referencia se ha realizado una adaptación

del esquema que puede encontrarse en Canivell et al. 2020 (Véase Fig. 2). Los modelos bidimensionales empleados a distintos niveles de detalle arquitectónico pueden servir de soporte a su posterior desarrollo en modelos tridimensionales (Hidalgo-Sánchez 2018), a través de plataformas geoespaciales de carácter tridimensional o el uso del BIM.

Para avanzar al quinto nivel, ULA-5 se hace necesario el soporte de un modelo digital tridimensional y, por tanto, más detallado. Se propone su obtención a partir de fotogrametría.

1.3 USO DE LA FOTOGRAMETRÍA DIGITAL COMO TÉCNICA DE ADQUISICIÓN

La tecnología juega un papel fundamental en la salvaguardia del patrimonio cultural, aportando nuevos métodos multidisciplinares que contribuyen a mejorar la labor de expertos en conservación (Merchán y Pérez 2020). La conservación y mejora del patrimonio cultural ha mejorado sustancialmente desde el desarrollo de las tecnologías digitales, como la fotogrametría digital y el uso de escáner láser (Sequenzia, Fatuzzo y Oliveri 2021). A estas dos técnicas se le suma una tercera más actual, la conocida como Sistemas de Mapeo Móvil (MMS), basada en la tecnología SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) (Benavides-López y Barrera-Vera 2020). El uso complementario de estas técnicas es frecuente (Alshawabkeh et al. 2020)

El uso de modelos 3D ha llegado a convertirse en un medio imprescindible para la interacción y la visualización de réplicas virtuales (Quattrini et al. 2020). Sin embargo, las herramientas digitales, capaces de generar modelos tridimensionales de alto grado de detalle, también implican un alto nivel de dedicación en cuanto a recursos humanos y materiales (Canivell et al. 2020). Por ello, es necesario implementar nuevos protocolos que aprovechen las posibilidades otorgadas por las actuales tecnologías digitales para un mejor conocimiento del patrimonio edificado (Masciotta et al. 2019).

Para el desarrollo de este trabajo se ha optado por la toma de datos a partir de fotogrametría. La mayor ventaja que presenta esta técnica frente al uso de escáner láser es la portabilidad, el bajo coste y la calidad de las texturas obtenidas en el modelo 3D (Henriques et al. 2020). Gracias a los avances en las técnicas de visión artificial, los algoritmos basados en el procesamiento de imágenes se han vuelto más competitivos para la generación de nubes de puntos. Concretamente, el algoritmo *Structure from Motion* (SfM), aplicado en fotogrametría digital, es la técnica de adquisición más robusta y precisa, aplicable también a objetos de gran escala (Pierdicca 2018).

Algunas partes de esta muralla han sido registradas en trabajos previos con técnicas fotogramétricas de alcance cercano, así como con láser escáner, con las

limitaciones propias de la tecnología del año 2005 (Barrera et al. 2005; Barrera-Vera, 2005).

Un exhaustivo levantamiento permite abordar estudios detallados de interés para la gestión, conservación e intervención.

2. OBJETIVOS

El caso de estudio utilizado se trata de una construcción de relativa complejidad y gran extensión. Por ello, en este trabajo se tiene como objetivo principal establecer una metodología para la recogida de datos geométricos y postprocesado que pueda ser aplicada a lo largo de toda la muralla. Para establecer dicha metodología, el trabajo se centra en un tramo de la muralla que se tomará como muestra, ya que contiene a todos elementos principales: portillo, muralla, liza, barbacana y torre (Véase Fig. 3).

Por otro lado, se pretende también obtener un modelo fotogramétrico de gran precisión que detalle el estado actual de la muralla, y que sirva como documento gráfico para registrar el estado actual en el que se encuentra.

Así mismo, se plantea a futuro la integración de este modelo fotogramétrico obtenido como herramienta de trabajo dentro de la GCD explicada anteriormente.

3. METODOLOGÍA

3.1 PLANIFICACIÓN

Como puede verse en la Fig. 4, lo que se denomina comúnmente como “muralla” es en realidad un conjunto de paños verticales, entre los que se puede diferenciar principalmente dos: la barbacana y el lienzo de muralla propiamente dicho. Además, existen otros elementos como las torres y los portillos, que se pueden encontrar de forma intermitente a lo largo de la muralla.

Para el completo registro de la geometría del tramo objeto de estudio, se han de considerar todas las caras que conforman los distintos elementos. No deben olvidarse elementos como el adarve o el almenado que coronan respectivamente barbacana y muralla.

Los paños de barbacana y de muralla que asoman a la liza serán considerados como paños interiores. Los paños opuestos a la liza se considerarán por tanto como paños exteriores.

Dicho esto, es posible diferenciar entre una considerable cantidad de paños para su registro (muralla interior, muralla exterior, barbacana interior, barbacana exterior, entre otros). Por ello la toma de datos fotogramétrica se ha planteado como una serie de trabajos independientes, los cuales posteriormente se unirán.

Se plantea realizar las siguientes tomas de datos:

- Toma 1: desde el foso para registrar la barbacana exterior, parte de la muralla interior (incluyendo al pórtico) y parte de la torre.
- Toma 2: desde la liza para registrar la barbacana interior y el adarve.
- Toma 3: desde la liza para registrar la muralla interior, el almenado y parte de la torre.
- Toma 4: Desde la Calle Macarena para registrar la parte exterior de la muralla (incluyendo al pórtico), parte de la torre y el almenado.

La planificación de este tipo de trabajos de levantamiento es vital para su correcta. Por ello, es importante prestar atención a algunas consideraciones como la distancia máxima desde la que las fotografías se deben tomar para conseguir la resolución deseada (Cabrera-Revuelta y Molero-Alonso 2016).

Para hacer posible la unión de las distintas tomas de datos se ha utilizado una red de apoyo topográfico.

De esta forma, las nubes de puntos que se obtendrán en el posterior procesado estarán referidas a un mismo sistema de coordenadas XYZ. Para ello se plantea la ejecución de un itinerario a partir de una estación total.

En este paso es importante optimizar el número de posicionamientos de la estación total, seleccionando el mejor conjunto de puntos de vista que proporcione una completa visualización de la geometría requerida (Cabrera-Revuelta et al. 2021).

Atendiendo a todo ello, se plantea la toma de datos utilizando los materiales que se detallan a continuación.

3.2 MATERIALES

Para el trabajo topográfico se ha utilizado una estación total Leica TS02, trípode, así como cinta métrica. Ha sido preciso hacer uso de prisma reflectante para conectar estacionamientos.

Por otro lado, para la realización de la toma fotográfica se ha utilizado una cámara de fotos SONY ILCE 6000, con un objetivo fijo de 16 mm (equivalente a lente de 24 mm en formato *full frame*). También ha sido preciso el uso de pértiga telescópica, así como de disparador por control remoto.

Además, se han impreso dianas codificadas de 12 bits-a partir del software Agisoft Metashape (Véase Fig. 5), usadas como puntos de control. La impresión se ha realizado sobre un papel resistente. Estos puntos de control suponen el nexo entre los datos topográficos y los datos fotogramétricos.

3.3 MÉTODOS

En primer lugar, las dianas codificadas se han colocado a lo largo de los distintos lienzos que componen la muralla: barbacana exterior e interior y muralla interior

y exterior. Las dianas se han dispuesto a distintas alturas, uniformemente distribuidas. Se han utilizado un total de 46 dianas codificadas, además de otros puntos de control ubicados en elementos externos al conjunto arquitectónico, como han podido ser señales de tráfico o rótulos de edificios cercanos.

Se planifica la red de estacionamientos de la siguiente forma. El primer estacionamiento (E1) se realiza en el foso. Este primer estacionamiento abarca un campo de visión amplio, permitiendo obtener las coordenadas de una gran cantidad de puntos de control. A continuación, se realiza un estacionamiento intermedio (E2) que sirva para conectar con el interior de la liza y con la Calle Macarena. El tercer estacionamiento (E3) se realiza por tanto en el interior de la liza. Gracias a éste se pueden obtener las coordenadas de los puntos de control ubicados en los paños interiores de barbacana y muralla. Por último y a través del portillo se visualiza un cuarto punto de estacionamiento en la calle Macarena (E4). Este último estacionamiento registrará los puntos de control ubicados por el lienzo exterior de muralla (Véase Fig. 6).

En el primer estacionamiento se ha creado un sistema de coordenadas propio, mediante orientación por ángulo. La unión de los tres estacionamientos siguientes se ha realizado a partir de la opción "orientación por coordenadas". Para ello ha sido preciso leer las coordenadas del siguiente punto de estacionamiento, así como las coordenadas de al menos otros dos puntos más que fuesen visibles desde el siguiente punto de estacionamiento. Ha sido preciso el uso de prisma reflectante, así como la lectura de puntos situados en elementos ajenos a la muralla (Véase Fig. 7).

Para la lectura de las dianas codificadas se ha tenido la precaución de asignar a cada punto el número que aparece impreso en cada marcador. Esto será muy útil para el posterior postprocesado de los datos.

En segundo lugar, para la realización de la toma fotográfica se han realizado distintos barridos a lo largo de cada paño. El solape entre imágenes ha sido de más del 70%, y siempre que fuera posible se han fotografiado las dianas codificadas (Véase Fig. 8).

Para tomar la geometría del almenado ha sido necesario el uso de pértiga (Véase Fig. 9). La cámara se ha colocado sobre la misma, y gracias a la aplicación móvil de la cámara se ha podido previsualizar la imagen y realizar el disparo con control remoto a partir de un dispositivo móvil.

Debido a la extensión del elemento, la incidencia del sol durante la toma de datos ha jugado un papel importante. Es usual que el trabajo de campo de elementos arquitectónicos se extienda durante largas jornadas de trabajo. Este hecho unido con el carácter inmueble de la muralla se traduce en una inevitable variación de las condiciones de luz. A esto debe sumarse el hecho de que cada paño tenga una orientación distinta.

La toma de datos se inició tomando en primer lugar las fotos de las partes que estaban en sombra. Posteriormente, al caer la tarde se completó con el registro de los paños que habían estado más expuestos al sol. En total se tomaron 619 imágenes.

El uso de dianas codificadas hace posible que el trabajo de colocación de marcadores en las imágenes se ejecute de forma ágil. El programa identifica de forma automática la posición de estas dianas en las imágenes, y les asigna el nombre que le corresponde. Esto supone un ahorro de tiempo importante y, además, permite controlar la precisión de la geometría obtenida a partir del algoritmo SfM. A continuación, se deben importar las coordenadas XYZ de cada marcador. El trabajo será más cómodo si en la toma de datos se ha tomado la precaución de asignar el nombre del punto correspondiente a la diana leída (Véase Fig. 10).

El trabajo de postprocesado se ha realizado con el software Agisoft Metashape. Para ello se realizaron diferentes subtrabajos. Estos subtrabajos reciben el nombre de *chunks*. En concreto han hecho falta seis *chunks*, los cuales se han unido fácilmente ya que todos estaban referidos a un sistema de coordenadas común (Véanse Fig. 11 y Fig. 12).

Ha sido necesario el uso de máscaras para eliminar elementos no deseados, como la vegetación, el cielo, o elementos que pudieran provocar ruido.

Cada *chunks* se procesó por separado, obteniéndose las nubes de puntos densa. Una vez alineados los distintos *chunks* a partir de los marcadores se obtiene una nube de puntos densa completa y escalada compuesta por cerca de 39 millones de puntos (Véase Fig. 13).

4. RESULTADOS

La nube de puntos densa obtenida a partir de fotogrametría ha servido de soporte para una primera aproximación al nivel ULA-4.

A partir de la nube de puntos densa también ha sido posible generar una malla texturizada, a partir de la cual se pueden exportar ortoimágenes (Véase Fig. 14).

Se ha hecho uso de la herramienta "Dibujar polilínea" que ofrece Agisoft Metashape para exportar las principales formas del modelo obtenido (Véase Fig. 15).

A partir de esta información se ha obtenido un modelo 3D simplificado en el cual se identifican las entidades que componen el nivel de definición ULA-4.

Como puede verse en la Fig. 16, el paso del nivel ULA-3 al ULA-4 implica la segmentación de la muralla, de la barbacana y de la liza. Se propone la división de estos elementos en tramos que comprendan entre 5 y 6 almenas.

Además, en este nivel se propone la división del tramo relacionado con las torres en tres partes: la derecha, la frontal y la izquierda.

5. CONCLUSIONES

El uso de modelos de datos bidimensionales aún resulta efectivo para determinados propósitos. Sin embargo, la inclusión de la tercera dimensión abre un abanico de posibilidades difícilmente abarcable desde otros enfoques metodológicos. Más allá de las obvias mejoras en cuestiones de visualización, cabe destacar que la tercera dimensión permite realizar análisis que tienen en cuenta nuevos atributos espaciales de la propia arquitectura y de su entorno.

En el caso que nos ocupa, la nube de puntos obtenida, en combinación con la estructura de datos establecida por la GCD, constituyen una base de información especialmente útil de cara a elaborar un modelo tridimensional con información asociada.

Una de las tareas fundamentales a la hora de abordar la construcción de este tipo de modelos 3D es la esquematización y división del conjunto en diferentes partes conformantes. Este tipo de sectorización, por un lado, facilita su modelado geométrico, y por otro, permite una vinculación individualizada y multiescalar de la información a cada una de las partes del conjunto. Este modelo puede servir tanto para registrar la geometría del objeto con precisiones adecuadas, así como soporte de consulta (Angulo et al. 2017; Rubio, Martín y Alonso 2018).

La metodología establecida en esta investigación se corresponde adecuadamente con esta labor. De este modo, los resultados obtenidos, tanto a nivel geométrico como semántico, abren las puertas a la construcción de un modelo de datos tridimensional. Esto último, se establece como una clara línea de trabajo futuro, en la que tienen cabida el uso de herramientas SIG 3D y el desarrollo de modelos HBIM.

Este tipo de modelos pueden llegar a constituir una potente herramienta digital que permita el mantenimiento predictivo, la conservación preventiva y la difusión de los principales valores de la muralla medieval de Sevilla.

En esta línea, se pueden encontrar aportaciones similares basadas en metodología BIM, como el proyecto H2020-Inception (Piaja et al. 2020) o SIG, como el European Project ResCult (Increasing Resilience of Cultural Heritage) (Chiabrando et al. 2018).

Para ello, la metodología de trabajo establecida en el tramo mostrado es susceptible de continuarse en el resto de los tramos de la muralla, permitiendo la obtención de datos ilustrativos, valorables y comparables del conjunto y de sus partes conformantes.

En lo que respecta a los resultados incluidos en este trabajo, la nube de puntos obtenida cuenta con una gran precisión geométrica. Esta nube de puntos también es una documentación muy valiosa que permite evaluar el estado actual de la muralla, y es susceptible de ser

comparada con toma de datos que se realicen en un futuro.

Para concluir, este trabajo puede mostrar cómo las técnicas fotogramétricas han evolucionado durante las dos últimas décadas. Es posible comparar los resultados obtenidos con los trabajos anteriores llevados a cabo en el mismo sitio (Barrera et al. 2005; Barrera-Vera 2005). Hoy en día, las técnicas fotogramétricas son capaces de proporcionar modelos detallados con texturas de alta calidad. Además, estos modelos son fácilmente intercambiables entre diferentes agentes, expertos o no. Este hecho no siempre fue posible. Como puede verse en los trabajos mencionados anteriormente, el modelo debía ser fragmentado y remodelado. Esto conllevaba a una pérdida de detalle que debía ser suplida con un estudio de iluminación para proporcionar una buena visualización del modelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Gerencia de Urbanismo del Ayuntamiento de Sevilla, especialmente al Servicio de Conservación Urbana y Renovación de la Edificación, al Servicio de Planeamiento y Desarrollo Urbanístico y a la Infraestructura de Datos Espaciales de Sevilla (IDE Sevilla).