

AS-BUILT GRAPHIC DOCUMENTATION OF THE MONUMENTO A LA TOLERANCIA. VALIDATION OF LOW-COST SURVEY TECHNIQUES

LEVANTAMIENTO GRÁFICO DEL MONUMENTO A LA TOLERANCIA. VALIDACIÓN DE TÉCNICAS DE LEVANTAMIENTO DE BAJO COSTE

Sara Morena^a , Borja Molero Alonso^b, José Antonio Barrera-Vera^c , Salvatore Barba^d 

^a Department of Civil Engineering, University of Salerno, Italy. smorena@unisa.it

^b Mave Aeronáutica, Trigo Group, Spain. borja.molero@trigo-group.com

^c Departamento de Ingeniería Gráfica, University of Sevilla, Spain. barrera@us.es

^d Department of Civil Engineering, University of Salerno, Italy. sbarba@unisa.it

Abstract

The *Monumento a la Tolerancia* is an emblematic sculpture realized by Eduardo Chillida, a perfect example for the documentation of sculptures with uniform textures, non-reflective colours and with poorly elaborated shapes through the implementation of various photogrammetric tools, as well as using different applications for processing phase. The basic data are photos taken quickly and without an accurate previous study, which is why the implementation of any target was not foreseen. In order to prove the results different kind of analysis were conducted. The first type was carried out analysing the results obtained from different software, with the use of the same instrument. The second one was a comparison of the models obtained with different tools, elaborated with the same software and the last one a validation of photogrammetric model with the laser scanner one. The complete results will be presented and critically discussed to validate these tools and applications.

Keywords: Architecture survey; 3D Photogrammetry, Point cloud; Comparison; Accuracy.

Resumen

El *Monumento a la Tolerancia* es una emblemática escultura realizada por Eduardo Chillida, un perfecto ejemplo para la documentación gráfica de objetos con texturas uniformes, colores mate y con formas simples mediante diversas herramientas fotogramétricas, así como mediante el uso de diferentes aplicaciones en la fase de postproceso. Los datos de partida proceden de fotos tomadas sin una planificación previa, por lo que no se ha contemplado la colocación de ningún tipo de dianas. Con el objeto de poner a prueba los resultados se han llevado a cabo diferentes tipos de análisis. El primero se ha realizado analizando los resultados obtenidos con diferente software pero usando la misma instrumentación. El segundo ha sido la comparación de los modelos obtenidos con diferentes herramientas pero elaborados con el mismo software. Finalmente se ha llevado a cabo una validación del modelo fotogramétrico con el modelo obtenido con escáner láser. Todos los resultados se presentan y discuten para validar las herramientas y aplicaciones empleadas.

Palabras clave: Levantamiento arquitectónico; Nubes de puntos; Fotogrametría; Comparación; Exactitud.

1. INTRODUCTION

Architectural survey with the implementation of digital technologies represents today one of the main methods for as-built graphic reproduction, both in the architectural (Molero et al. 2013: 673), archaeological (Fioretti et al. 2020: 2) and sculptural field (Loaiza Carvajal et al. 2020: 234). The possibility of reaching rigorous measurements and the massive nature of the technology, in fact, allow interrogating repeatedly the documentation and to obtain technical elaborations with different degrees of resolution. Based on previous studies (Morena et al. 2019: 135) and SfM comparative analysis (Rodríguez-Navarro 2012: 100; Gil-Piqueras et al. 2019: 645), this contribution aims to analyse not only the opportunities that the new low-cost technologies guarantee in the field of sculptural heritage (with homogeneous textures, simple geometric shapes and non-reflective materials), but also comparative evaluations of surveys of the same object when the variables are not only the instruments but also the times and above all the operators. The progress achieved, both hardware and software, in the field of surveying makes it increasingly easy to

generate models even from acquisitions that are not perfectly pondered.

The possibility of implementing photos acquired through technologies that are now widely used, compact cameras and smartphones (Shults 2017: 481), as well as the availability of low-cost and user-friendly software, in fact, allows pursuing sufficiently accurate results. This ensures greater digitization of the heritage (Tabone 2019: 48), even if, only for divulgation purposes: web visualization, virtual tours, as well as innovative ways to catalogue and store documents in eminently graphic, technical and architectural history databases. The aim of this paper is the analysis and comparison of three-dimensional models of the *Monumento a la Tolerancia* (Figure 1). The attention is focused on this monument following the collection of many survey experiences conducted by different people (even non-experts) obtained during the years with various instruments (FARO focus^{3D} X330, Nikon COOLPIX L11 and Apple iPhone 11) and processed with some software (SCENE, PhotoModeller, Metashape, eyescloud3D, 3DF Zephyr and ReCap Photo). To prove the accuracy of these data, several analyses have been carried



Fig. 1. Monumento a la Tolerancia and Puente de Isabel II. Source: own elaboration 2008.

out, the first one to evaluate the difference pursued by the various software in the processing of data coming from the same instrumentation.

A second analysis was carried out, instead, comparing the best results obtained with the two different instruments processed with the same software. Finally, the need to practically prove commercial and usual technologies for the restitution of models inevitably involved the comparison of the data acquired with a laser scanner characterized by high precision and accuracy (Figure 2). Although the results of this investigation are achieved with scientific rigor, the data of this research are presented here with a predominantly informative intent.

1.1 HISTORICAL INTRODUCTION

The *Monumento a la Tolerancia* is an emblematic sculpture located in Seville and signed by the author Eduardo Chillida (San Sebastián, 1924-2002). It was inaugurated in 1992 at the Universal Exhibition in Seville in memory of the Edict of Granada, with which the Jews were expelled from the Catholic monarchs.

The work, financed by the Fundación Amigos de Sefarad, is located on the “Muelle de la Sal”, Paseo del Alcalde Marqués del Contadero, next to the Puente de Isabel II, popularly known as Puente de Triana (Rabe 2014: 137). Made entirely of reinforced concrete, it rises to a total height of about 4 m and extends 12 m wide. Opposing the violent and suffering past, it presents itself as a great embrace between different cultures, to encourage understanding and tolerance (Matos 2015: 99). Despite its apparent simplicity, seen from different perspectives, it always assumes different configurations, once the left arm protrudes, another one prevails the right one, seemingly every portion of the work is “always different but never the same” (Chillida 2016: 103). The absence of visual uniformity of the work is the very emblem of tolerance, there is no single point of view, only respect for diversity that can coexist together. Despite its artistic and symbolic importance, following several acts of vandalism, the sculpture had an extremely degraded appearance, which is why it was necessary to clean and consolidate it. This, however, was not enough to limit further acts of vandalism that replicated themselves on the structure, underlining even more the need to document, detect and digitize

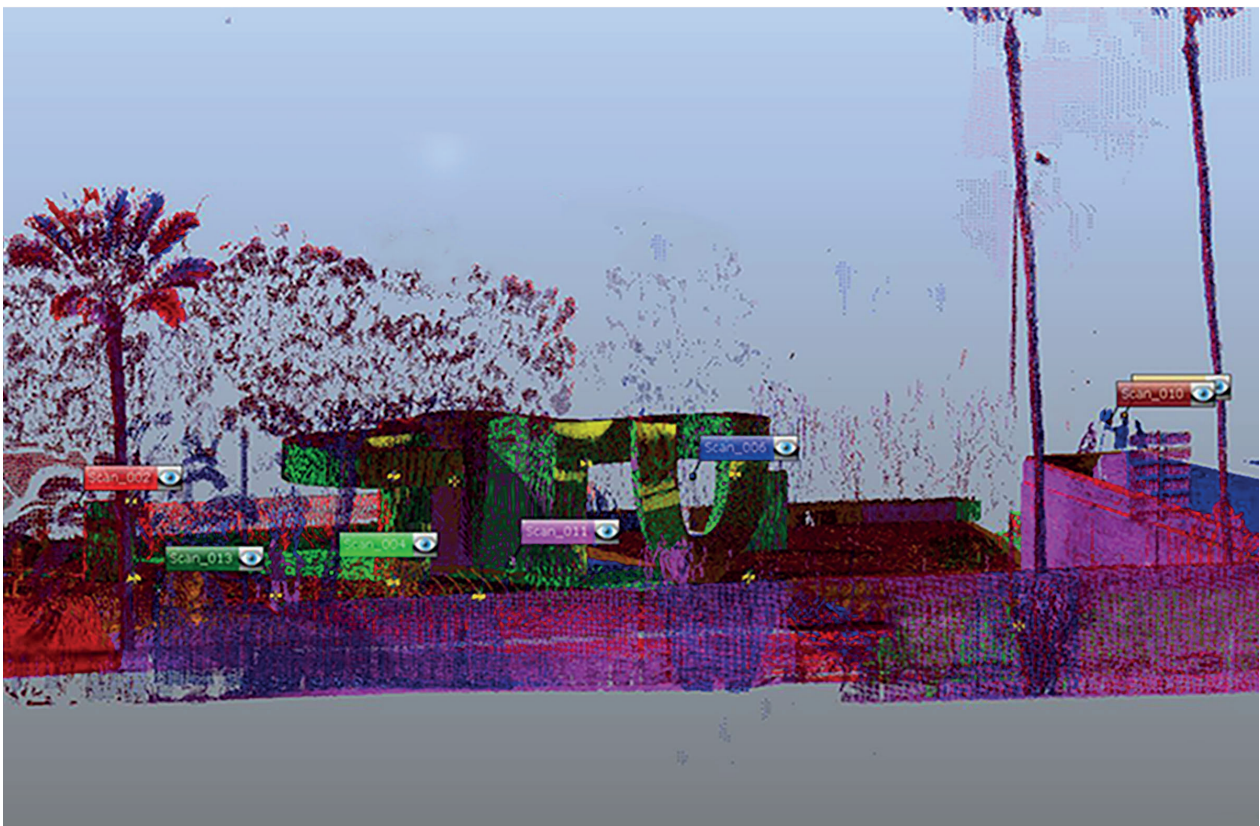


Fig. 2. Correspondence view based on point clouds laser acquired with FARO Focus^{3D} X330. Source: own elaboration 2020.

our heritage to preserve, divulge and catalogue it by generating an archive of data available for any eventuality.

2. DATA ACQUISITION AND PROCESSING

The data acquired by different operators and in different time were reached by three different instruments and processed with various software, described below (the information contained is mainly taken from the respective manuals). It is also essential to underline that some acquisitions were carried out by inexperienced personnel and only for documentary purposes. The choice of photogrammetric programs for data processing fell on both professional and user-friendly applications where the interaction with the user during the process is strongly limited. In particular, the software implemented are Metashape by Agisoft and 3DF Zephyr by the Italian 3DFLOW. They are applications that operate in Structure for Motion (SfM) for the pseudo-automatic processing of three-dimensional photo-realistic models. In the second case, the choice fell on eyescloud3D and ReCap Photo. The first consists of an app connected to the cloud, accessible via both mobile phone and computer, of the Spanish eCapture3D. It automatically proceeds at the generation of point cloud and mesh, without the need of high-performance computers, and, at the end, it provides to display the model

on a networked platform. With a very simple interface, it also allows different iterations of measurement and editing, as well as the possibility to geo-reference and download the model. ReCap Photo is a service included with Autodesk's ReCap Pro, which allows processing close-range or drone photos for the generation of point cloud, mesh and orthophoto. With a simple graphical interface, also in this case the process of the data is performed on the internet, allowing data editing once the model has been processed. However, given the characteristics of the monument and the close-up shots, the best results were obtained by operating in object mode, which automatically generates a textured mesh. The workflow with the use of Metashape and 3DF Zephyr software is mainly based on five consecutive steps: cameras orientation and images alignment with the generation of a sparse cloud, detection of control points (extracted from the laser scanner model) to locate and scale the model, dense cloud construction, mesh generation and model texturization. Differently to the previous cases, with the eyescloud3D and ReCap Photo applications, we proceeded to select the photos and start the process and, only after the generation of the model, we could scale and export it. At general level, the main difficulties encountered were: the alignment of the cameras, despite a sufficient overlap of about 70% with both COOLPIX L11 and iPhone 11, and

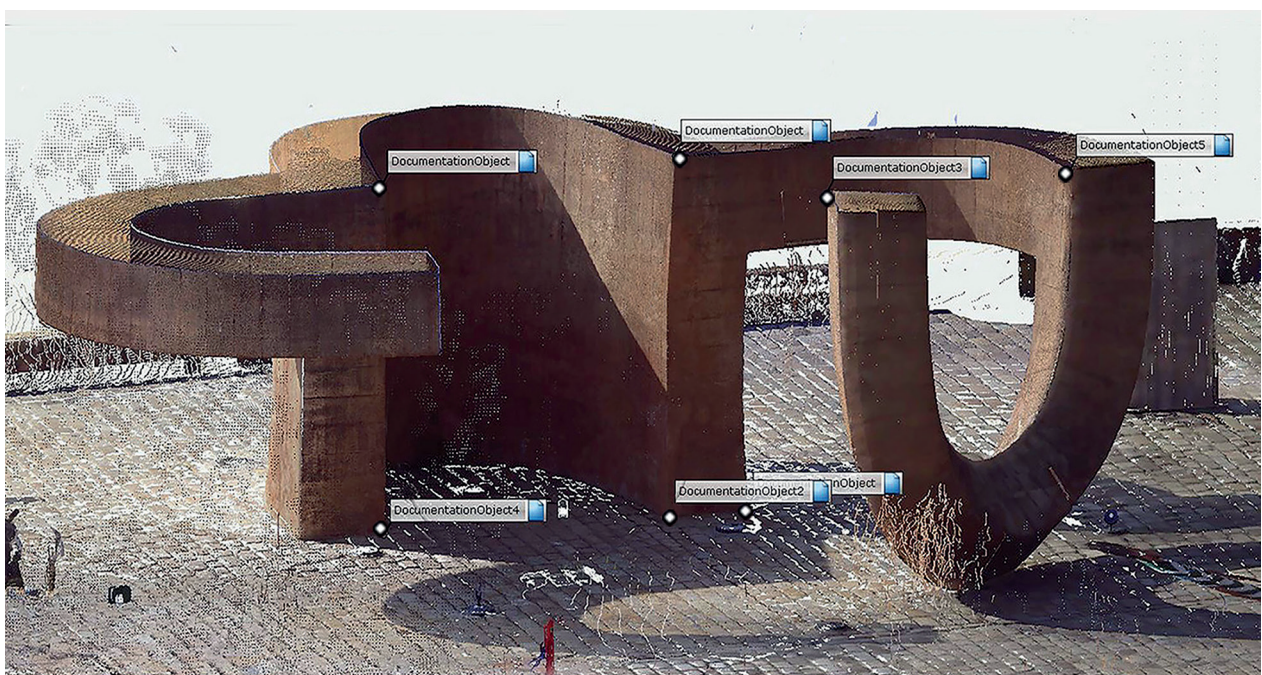


Fig. 3. 7-points identified on the laser scanner point cloud. Source: own elaboration 2020.

the absence of targets related to a monument characterized by homogeneous texture and simple geometric shape. The selected Control Points were extracted from the laser scanner model. The coordinates of 7 points were identified to locate and scale the photogrammetric models (Figure 3). Finally, the absence of a photographic pole or a UAV flight made impossible to return the upper part of the model, which is why all the processed data have gaps in the upper part. Tables visible in the figures 4 and 5, schematize the main data processing obtained during the alignment phase, dense cloud and mesh generation respectively.

2.1 FARO FOCUS^{3D} X330

Phase difference laser produced by the CAM2 company, is characterized by its weight (only 5 kg) and compactness, properties that guarantee an easy management of the device facilitating its movement between the various positions. The field of view covers an opening of 360° horizontally and 300° vertically, with an acquisition depth from 0.6 m to 330 m (Gollob et al. 2019: 4). The photographic

sensor, which allows colour acquisition during scanning, is integrated in the system and allows further limitation of errors during data processing. To facilitate and speed up the acquisition of scans, realized in 2015, a first 360° pre-acquisition has been carried out for each station, with a distance between points of 15.35 mm at 10 m (1/10 resolution and 4× quality). Only afterwards, a higher resolution acquisition (1/4 with the same 4× quality), with a points distance of 6.14 mm at 10 m and with the addition of colorimetric information, was carried out. Data management and processing were conducted in 2020 with the proprietary software of the scanner, SCENE (version 2019.0.0.1457). The information collected directly from the instrument during acquisition (altimeter, compass, inclinometer, and GPS) guaranteed easier management of the 7 scans used to generate the reference point cloud. At a first manual recording, through the identification of homologous elements in the scans, an automatic cloud-to-cloud recording followed with the aim of making improvements in the final global spatial registration of the model. The generated cloud has about 58,000,000 points, with an average point error

Model Dataset		Align			
		Number of images	Cameras Aligned	% Aligned	RMS re-projection error (px)
Nikon COOLPIX	MetaShape	77	74	96,10	0,46
	3DF Zephyr	77	70	90,91	0,50
	Eyescloud3D	51	-	-	-
	ReCap Photo	77	-	-	-
Apple iPhone 11	MetaShape	83	82	98,80	0,90
	3DF Zephyr	83	81	97,59	0,64
	Eyescloud3D	83	-	-	-
	Recap Photo	83	-	-	-

Fig. 4. Main data processing in the align phase. Source: own elaboration, 2020.

Model Dataset		Dense Cloud -Mesh			
		Key points limit	Number of points	Mesh faces	Mesh verices
Nikon COOLPIX	MetaShape	40000	41711421	8929407	6567578
	3DF Zephyr	7500	2279565	2264283	1135043
	Eyescloud3D	-	1522843	169074	100371
	ReCap Photo	-	-	869428	436372
Apple iPhone 11	MetaShape	40000	38728097	8280974	6885737
	3DF Zephyr	7500	1047405	12121378	
	Eyescloud3D	-	1995772	404978	230711
	ReCap Photo	-	-	1121621	563273

Fig. 5. Main data processing in the built phase of dense cloud and mesh. Source: own elaboration 2020.

of about 8 mm and a 20% overlap of scans. Finally, through a *Clippinbox*, the area of interest has been selected to export it for comparison on third-party software.

2.2 COOLPIX L11

Compact Nikon camera featuring 1/2.5" CCD sensor of 6.2 MP, a variable focal length between 6.2-18.6 mm and a focal aperture of f/2.8-5.2. Its simplicity of operation and its particular sensitivity to light with an ISO 800 make it easy to use even for non-professional people. The photographic acquisitions made on site in the 2008 were made only for documentation purposes and, therefore, without the use of targets. The inspection concluded with the acquisition of 77 photographs of the sculpture from different angles. The Metashape processing, carried out by setting the *Highest* accuracy (maximum resolution of the photos) and a key point limit of 40,000, ended with the alignment of 74/77 photos. A dense cloud, consisting of about 42,000,000 points and a mesh model of 8,000,000 polygons, was then created. In the case of the 3DF Zephyr application the best results were achieved by setting, during the orientation phase of the cameras, key point limits of 7,500 and a 100% resolution of the images guaranteeing an alignment of 70/77. The results obtained are a dense cloud of about 2,000,000 points and a polygonal mesh of as many faces, characterized by several gaps especially near the left arm.

The data processing through the eyescloud3D application gave better results with the selection of only 50/77 photos, generating a cloud of about 1,500,000 and a mesh of 170,000 polygons, with the presence of various gaps scattered in the model. Finally, the data was also processed with ReCap Photo, which allowed the generation of a mesh model of about 870,000 faces but with various deformations especially near the arms.

A further software, implemented in 2008, to manage this data was PhotoModeler v.6. In this case, the calibration of the camera was carried out successively to the survey: it consists in a process where it is necessary to take photos (maintaining fixed the parameters) of a grid with a series of points with theoretical coordinates provided by the software. The comparison of these points with the reality captured by our camera allows us to define the degree to which

the field images are deformed by the lens, for subsequent correction. Successively, we proceed in the generation of the three-dimensional scene with the detection of homologous points between the images, by which the positions of the cameras in the space are calculated now of making the shot. This is an arduous process which Structure from Motion systems (also available in newer Photomodeler releases) have improved. Once all the necessary images have been oriented, the model is constructed on which, subsequently, the surfaces representing the monument are defined.

Finally, the textures are projected on the surfaces, ensuring that they come from the images in a more orthogonal situation, and without obstacles, for a better photorealistic quality.

2.3 IPHONE 11

Smartphone designed and manufactured by Apple characterized by a 1/2.55" CMOS sensor and a double camera of 12 MP, one wide angle and one ultra-wide-angle. Very popular in recent years, it guarantees the production of good quality photos even by inexperienced users. The inspection, once again carried out without a properly significant purpose and in the absence of targets, it was conducted in the 2020 and ended with the realization of 83 photos.

The parameters used in Metashape, very similar to the previous ones, with maximum accuracy and resolution of the photos during the orientation phase, allowed to obtain an alignment of 82/83 photos. Despite the higher number of acquisitions, the generated cloud has a number of points equal to 38,000,000 and a mesh of about 8,300,000 faces similar to the model with the Nikon. In the same way of 3DF Zephyr, the best results were obtained by setting key point limit values at 7,500 and maximum photo resolution, ensuring an alignment of 82/83 photos, a cloud model with 1,050,000 and a mesh of about 12,000,000 faces. Using 83/83 photos it was possible to proceed with the creation of the model also in eyescloud3D, a cloud of about 2,000,000 and a mesh of 405,000 polygons was generated. Finally, we use ReCap Photo with the generation of a mesh consisting of about 1,000,000 polygons and deformations evident in various parts of the model.

3. COMPARISON

The processed data were compared to validate what was attained. A first analysis was carried out by verifying the best results achieved using the same tool and processing the data with different software. Subsequently, based on what had been obtained, the main differences between two of the best models realized with COOLPIX L11 and iPhone 11 were evaluated and finally everything was validated by comparing the preferable model with the one detected by laser scanner. However, while in the case of professional applications such as Metashape and 3DF Zephyr the comparison can be based on statistical data extracted and processed directly by the software during the elaboration time, the same cannot be conducted in the case of the remaining two applications. To make further comparisons, the models were exported in universal format and compared in a third-party software, CloudCompare V.2.10.2. For a comparison between dense clouds, “Cloud-to-Cloud Distance

computation” (C2C) was used. It is the default way to compute distance between dense clouds in the software: for each point of the compared cloud, it searches the nearest point in the reference cloud and computes their (Euclidean) distance. In the case of point cloud and mesh comparison, necessarily we should have proceeded with “Cloud-to-Mesh Distance computation” (C2M) in which for each point of the compared cloud, the software should identify the closest triangle in the reference mesh. However, operating in this way, the software will automatically identify the mesh as the reference element. To invert the models and consider the cloud generated by Metashape as a reference, it was necessary to first sample the mesh and, only then, compare it.

3.1 SOFTWARE COMPARISON

Tables (Figure 6 and 7) show, for both COOLPIX L11 and iPhone 11, the re-projection errors of the x, y, z coordinates for each Control Point used in

COOLPIX L11								
Point	Metashape				3DF Zephyr			
	Error x (cm)	Error y (cm)	Error z (cm)	Error 3D (cm)	Error x (cm)	Error y (cm)	Error z (cm)	Error 3D (cm)
point 1	0,20	0,48	0,37	0,64	0,43	0,77	0,11	0,89
point 2	1,54	0,08	0,30	1,58	2,15	0,07	0,20	2,16
point 3	1,38	0,87	1,21	2,03	2,39	1,45	1,12	3,01
point 4	0,27	1,08	0,14	1,12	1,17	1,26	0,29	1,75
point 5	1,85	0,29	0,15	1,88	0,20	1,13	0,44	1,23
point 6	1,11	0,25	0,18	1,15	0,87	1,08	0,30	0,14
point 7	0,67	0,74	0,78	1,26	0,10	1,20	0,59	1,34

Fig. 6. Re-projection errors for each Control Point with the Nikon COOLPIX L11 instrument. Source: own elaboration 2020.

iPhone 11								
Point	Metashape				3DF Zephyr			
	Error x (cm)	Error y (cm)	Error z (cm)	Error 3D (cm)	Error x (cm)	Error y (cm)	Error z (cm)	Error 3D (cm)
point 1	2,25	0,35	1,67	2,83	2,16	3,42	2,81	4,92
point 2	0,57	0,79	0,83	1,28	3,10	3,02	3,16	5,36
point 3	2,73	1,69	3,41	4,68	4,39	1,65	0,89	4,77
point 4	0,49	4,50	0,12	4,53	1,79	0,39	2,20	2,86
point 5	0,69	1,13	0,20	1,34	0,59	1,94	2,01	2,85
point 6	0,38	2,66	1,77	3,22	0,47	2,54	0,69	2,68
point 7	1,47	0,82	0,53	1,77	4,18	2,24	0,36	4,75

Fig. 7. Re-projection errors for each Control Point with the iPhone 11 instrument. Source: own elaboration 2020.

the first two software (the position of the points are visible in the previous figure 3). As can be seen, in the case of Nikon tool, the 3DF Zephyr software has slightly higher deviation values than Metashape, reaching a medium value of error of about 1.50 cm respect to 1.38 cm of Metashape, with maximum value of 3.0 cm for the point 3.

More difference, instead, are visible in the case of iPhone 11 instrument with the point 2 that reach an error of about 5.00 cm in the case of 3DF Zephyr software.

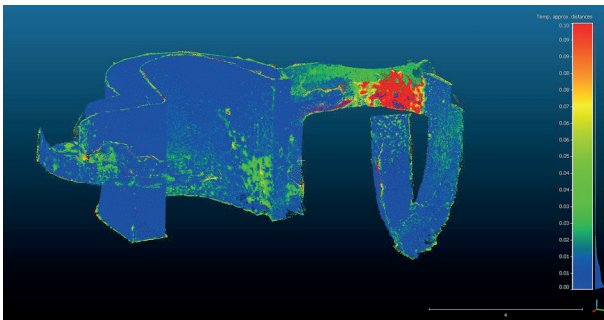


Fig. 8. The comparison between the photogrammetric point clouds of Metashape and 3DF Zephyr (Nikon). Source: own elaboration 2020.

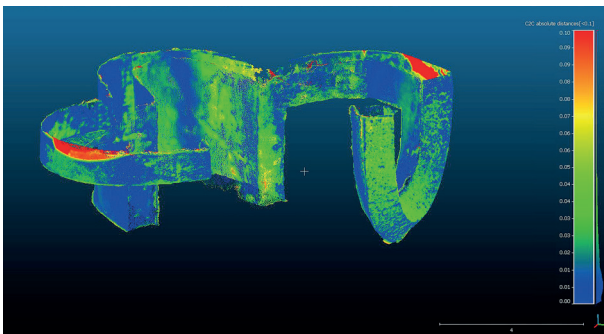


Fig. 9. The comparison between the photogrammetric point clouds of Metashape and eyescloud3D (Nikon). Source: own elaboration 2020.

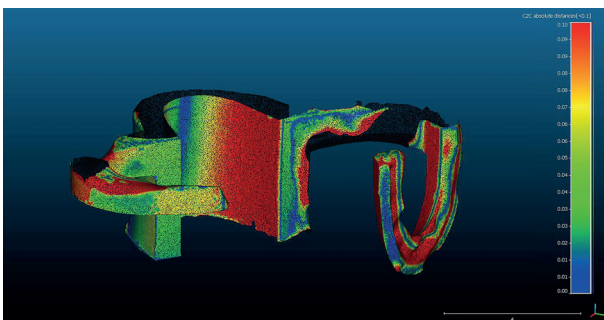


Fig. 10. The comparison between the photogrammetric point clouds of Metashape and ReCap Photo (Nikon). Source: own elaboration 2020.

A further comparison, as previously specified, has been carried out within the CloudCompare software to evaluate the existing deviations between the model surfaces (Barba et al. 2019: 149). The Metashape point cloud achieved the best results and was taken as a reference for comparison with the remaining models extracted from the software. In the figures 8, 9 and 10 it is possible to visualize the result of the above analysis. The column on the right of the image represents the range of the existing deviation between points belonging to two different models which are, in fact, represented in false colours. The maximum deviations (in red) reach values equal to 10 cm and are visible in the first comparison only in a portion of the left arm.

Satisfactory, are also those obtained with eyescloud3D software, instead, obvious

Gauss: mean = 0.010059 / std.dev. = 0.013013 [1394 classes]

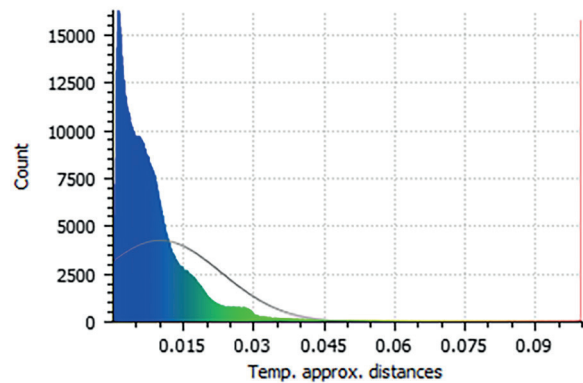


Fig. 11. The graphic distribution of the comparison Metashape with 3DF Zephyr (Nikon). Source: own elaboration, 2020.

Gauss: mean = 0.020542 / std.dev. = 0.018426 [1228 classes]

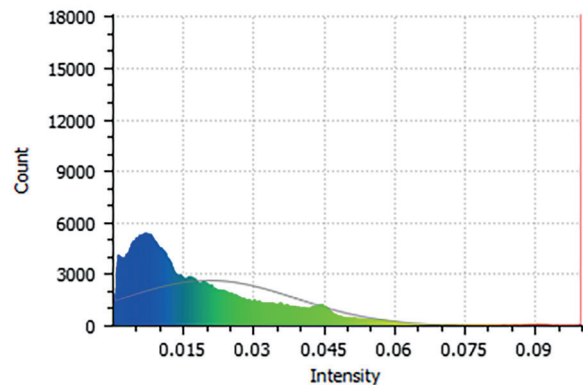


Fig. 12. The graphic distribution of the comparison Metashape with eyescloud3D (Nikon). Source: own elaboration, 2020.

deviations, are mainly shown in the model returned with ReCap Photo. The results of the point-to-point comparison of the models generated by the different software used to process the COOLPIX L11 data have been schematically shown in the graphs where on the x-axis are the deviation values in m and on the y-axis the number of points to which this value corresponds (Figure 11 and 12).

From what we can see, the best results were achieved in comparison with 3DF Zephyr which has the lowest standard deviation value (1.3 cm), however, good results were also achieved in the case of eyescloud3D with standard deviation values close to 1.8 cm as well as the return of a complete model without significant gaps. Less satisfactory are those generated by ReCap Photo with a standard deviation reaching a value of about 3 cm.

The peak of the curve is close to 0.15 cm for comparison with 3DF Zephyr and the analysis of the graphic show as the 90% of the point have a deviation less than 2 cm. In the case of eyescloud3D, most points have values of deviation of 0.80 cm with around 70% of with deviation less than 2 cm. Further comparisons have been made with the iPhone 11. From the analysis of the figure 13, we can be seen that the comparison of the Metashape and 3DF Zephyr models has more deviations than the previous comparison with the Nikon. Values of about 10 cm occur mainly near the left arm, they are confirmed by an incorrect alignment in 3DF Zephyr model.

Better results, in this second case, came from the eyescloud3D application, which allowed to generate a dense cloud with slight deviations from Metashape, reaching a standard deviation value of about 1.4 cm (Figure 14). Once again, the distribution is schematically shown in the graphic visible in the figure 15, with the highest frequencies near the value of 0.15 cm and around 80% of points with deviation less than 2 cm. Otherwise, ReCap Photo has returned a model with a strong deviation from the reference one, not only on the arm, but in the general model, reaching in some points significant differences more than 10 cm (Figure 16).

3.2 INSTRUMENTS COMPARISON

As previously mentioned, a further comparison was made between the results obtained

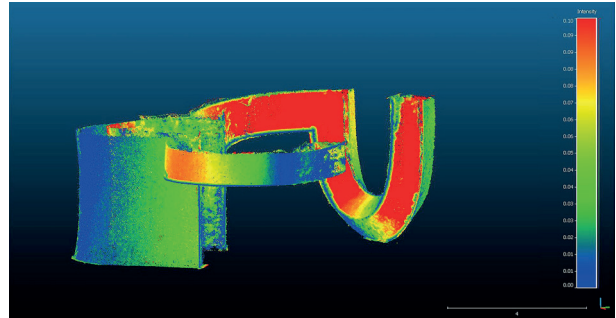


Fig. 13. The comparison between the photogrammetric point clouds of Metashape and 3DF Zephyr (Apple). Source: own elaboration 2020

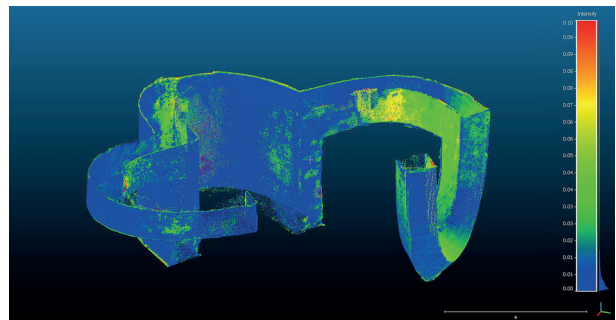


Fig. 14. The comparison between the photogrammetric point clouds of Metashape and eyescloud3D (Apple). Source: own elaboration 2020

Gauss: mean = 0.011243 / std.dev. = 0.013890 [1411 classes]

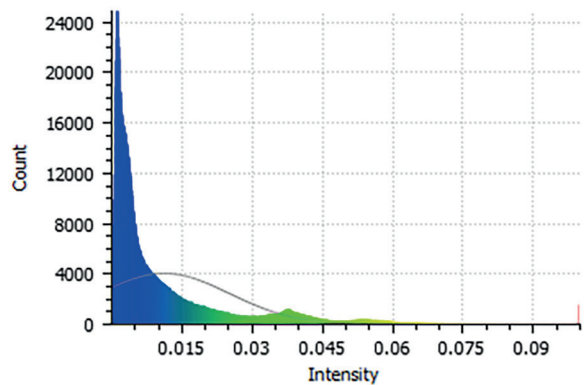


Fig. 15. The graphic distribution of the comparison Metashape with eyescloud3D (Apple). Source: own elaboration 2020.

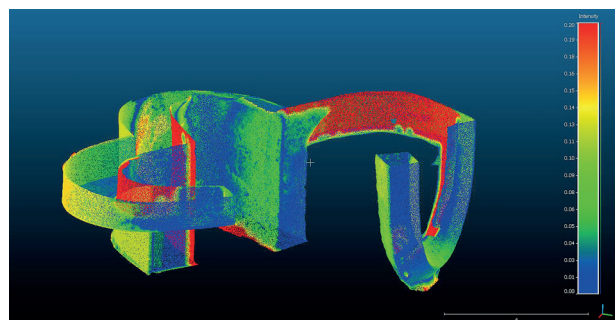


Fig. 16. The comparison between the photogrammetric point clouds of Metashape and ReCap Photo (Apple). Source: own elaboration 2020.

with Metashape from the data acquired with two different COOLPIX L11 and iPhone 11 instruments. The analysis of the re-projection error for the coordinates of the control points, visible in the previous tables in the figure 6 and 7 shows a higher value for the data processed with the smartphone, as well as a cloud of points and a mesh model with some gaps. The study of the deviation between the two surfaces was conducted within the CloudCompare software, operating with the C2C algorithm. From what we can see in the figure 17, the two models have a quite similar distribution. The standard deviation that can be extracted from the comparison is equal to a value of 1.7 cm and the distribution graph reaching the highest point near the value of 0.40 cm. These results, therefore, allow to confirm the similarity existing between the two models, in fact more than 90% of points have a distance less than 3 cm except for some present mainly on the arms and on the edges of the monument.

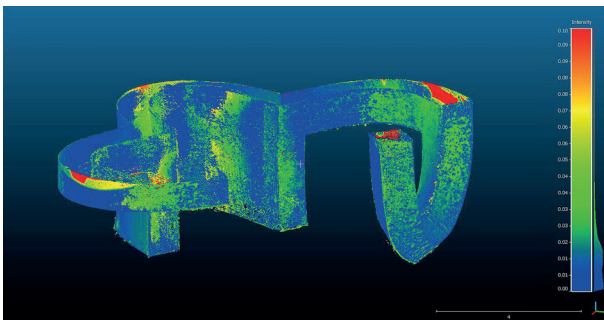


Fig. 17. The comparison between the photogrammetric point clouds of Metashape (Nikon vs Apple). Source: own elaboration 2020.

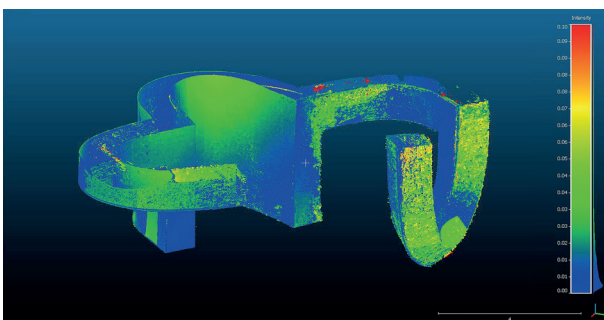


Fig. 18. The comparison between the photogrammetric point clouds of Metashape (Nikon) and laser scanner. Source: own elaboration 2020.

3.3 MODEL VALIDATION

In order to prove the results obtained, a further comparison was made by comparing the cloud

extracted from Metashape made from the data acquired with the COOLPIX L11 and those obtained from the FARO Focus^{3D} X330 laser. The choice fell on the Nikon model for the best results, both metric and geometrically, presenting a complete cloud without significant gaps. The analysis has been carried out again with the C2C algorithm of the third-party software CloudCompare. The results pursued can be seen in figure 18. Surface deviations with values close to 10 cm are almost absent if not in some points near the edges, mainly due to cloud noise.



Fig. 19. 3D printing of the photogrammetric model. Source: own elaboration 2015.

The standard deviation pursued in this comparison, in fact, reaches values close to 1.3 cm with 90% of the points having a value of less than 3 cm. The graphic present the highest intensity of points with a deviation of about 0.35 cm.

4. CONCLUSION

Before proceeding with the conclusions, it is necessary to highlight and specify more important differences between the technologies used. First, the different tools in the data acquisition phase. In the case of photogrammetric surveys, we opted for two economic instruments that are easy to use and widely available on the market. These characteristics also allow non-specialist operators to access equipment that offers satisfactory results for photogrammetric activities, without great expense; obviously, considering the objectives of each project.

The laser scanner, on the other hand, is a technological and specialized tool with a much higher price than the previous ones. It can acquire dense point clouds (976,000 points per second, according to FARO specifications) that makes its

manipulation, interpretation, and management difficult. Another clarification to be considered is the characteristic of the sculpture that presents a homogeneous texture and simple geometric shape. Such peculiarities, in fact, make difficult for photogrammetric software to align and orient the images, even more if the survey was conducted by an inexperienced user without the presence of targets. Finally, in the analysis carried out we decided to implement two software that operate in cloud where the management of parameters is minimal if not nothing at all, consequently manageable by an increasingly wide audience.

By critically analysing the data pursued it is possible to see how, despite the implementation of low-cost and commercial technologies, the comparison for some models (Metashape obtained with Nikon photos vs Scene FARO) has generated satisfactory differences in the point cloud. The same can be said with the point cloud generated by eyescloud3D for the data from iPhone 11. The two models not only look complete and without gaps, but also have acceptable deviations from the reference point clouds. In the case of the remaining models, it is possible to underline the presence of greater errors but still acceptable as data to use for the generation of models for viewing via web or for 3D prints (Figure 19), above all given their greater lightness and manageability. Following the great progress achieved in the photogrammetric field, in fact, it is possible to achieve increasingly satisfactory results, often compensating for instrumental deficits or the inexperience of operators. On a general level, it is possible to appreciate a high level of phase-shift between the models in the areas of the monument's arms due certainly to the lack of total station control points in the photogrammetric survey. It is therefore an aspect of easy solution, but this decision is the result of the objective of comparing cheap, wide diffusion tools and easy to use by non-expert people. The three-dimensional model of the laser scanner, as expected, provides accurate metric information and a high degree of surface detail. This model can be preserved as a

true digital copy of the real monument. In short, it will be a valuable database from which to analyse or carry out further studies in the office. It can be inferred, from what was previously exhibited, how the potential of these technologies, even if low-cost, shows a promising present and future for culture and heritage conservation. In recent years, the potential of photogrammetry together with advances in SfM computational visualization and technology affordable for many, provide us to generate satisfactory results in this area, always related to the objectives to be pursued, taking into account that without using control points and professional equipment and procedures the results are not suitable for metric or scientific purposes.

The most complex phase of SfM photogrammetry is to take photos: anyway, in the work we wanted to evaluate photographs taken by non-professionals and thus to analyze the presence of gaps, aberrations, etc. Likewise, to better take into account the economy and simplicity of SfM photogrammetry, we worked with consumer software (a possible development would be the use of other free software) and cameras with different quality lenses. The deviations shown in the article - many inadmissible - are referred to a small architectural element and do not allow generalization of the results in the case of a large construction: where, on the other hand, the survey would be carried out only by professionals. In conclusion, it is possible to observe that the use by non professionals can bring low quality results that, although, they can be used for consumption, nothing to do with professional, scientific surveys, where the operator handles many more complex factors that will guarantee the quality, rigor and fidelity of the models obtained. All of this forces us to emphasize the contribution of engineers and/or architects, also in the use of automated resources. Finally, we can argue that we do not do survey with SfM photogrammetry, which is an instrument, but with the head, with the brain, with the mind.

REFERENCES

Barba, S., di Filippo, A., Limongiello, M., Messina, B. 2019. "Integration of active sensors for geometric analysis of the chapel of the Holy Shroud". *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W15, pp. 149-156. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-149-2019>

Chillida, E. 2005. *Escritos*. Madrid. La Fábrica. ISBN: 8416248702.

Gollob, C., Ritter, T., Wassermann, C., Nothdurft, A. 2019. "Influence of Scanner Position and Plot Size on the Accuracy of Tree Detection and Diameter Estimation Using Terrestrial Laser Scanning on Forest Inventory Plots". *Remote Sensing*, vol. 11, no 1602, pp. 1-30. <https://doi.org/10.3390/rs11131602>

Fioretti, G., Campobasso, C., Capotorto, S. 2020. "Digital photogrammetry as tool for mensiochronological analysis: The case of st. Maria Veterana archaeological site (Triggiano, Italy)". *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 19, p. 1-10. <https://doi.org/10.1016/J.DAACH.2020.E00158>

Gil-Piqueras, T., Rodríguez-Navarro, P., Pérez-Vila, A. 2019. "Fotogrametría multi-imagen mediante SFM: revisión del software disponible". *Avances en expresión gráfica aplicada a la edificación*. Valencia. Tirant. pp. 645-660 ISBN 978-84-17973-12-4

Loaiza Carvajal, D.A., Morita, M.M., Bilmes, G.M. 2020. "Virtual museums. Captured reality and 3D modeling". *Journal of Cultural Heritage*, vol. 45, pp. 234-239. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2020.04.013>

Matos, B. 2015. "La idea de escala en Chillida/The scale idea on Chillida". *Revista europea de investigación en arquitectura: REIA*, no. 4, p. 93-104.

Molero Alonso, B., Martínez Rocamora, A., Barrera Vera, J.A. 2013. "Virtual reconstruction of capitals of the Real Alcázar de Sevilla". In *XXXV Convegno Internazionale dei Docenti della Rappresentazione e Decimo Congresso UID*. Matera, Italia, p. 673-680. ISBN 978-88-492-2728-4.

Rabe, A.M. 2014. "Diálogo entre las formas. La ética del espacio y el tiempo. Dialogue between Forms. Ethics of Space and Time". *Escritura e imagen*, vol. 10, no. especial, p. 135-153. ISSN: 1885-5687. https://doi.org/10.5209/rev_ESIM.2014.46924

Rodríguez-Navarro, P. 2012. "Digital Photogrammetry versus the systems based on active 3D sensors". *EGA Revista de expresión gráfica arquitectónica*, nº. 20, pp. 100-111, Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/ega.2012.1408>

Shults, R. 2017. "New opportunities of low-cost photogrammetry for Culture Heritage preservation". *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-5/W1, pp. 481-486. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-481-2017>.

Tabone, W. 2019. "Technology for Cultural Heritage". In *Tesseræ Spring Edition, Heritage Malta*, pp. 46-54.

How to cite this article: Morena, S., Molero Alonso, B., Barrera-Vera, J. Barba, S. 2020. "As-built graphic documentation of the Monumento a la Tolerancia. Validation of low-cost survey techniques", *EGE Revista de Expresión Gráfica en la Edificación*, N° 13, Valencia: Universitat Politècnica de València. pp. 98-114. <https://doi.org/10.4995/ega.2020.14766>

DOCUMENTACIÓN GRÁFICA DEL MONUMENTO A LA TOLERANCIA. VALIDACIÓN DE TÉCNICAS DE LEVANTAMIENTO DE BAJO COSTE

1. INTRODUCCIÓN

El levantamiento arquitectónico con la implementación de tecnologías digitales representa hoy en día uno de los principales métodos de reproducción gráfica as-built, tanto en el campo arquitectónico (Molero et al. 2013: 673), arqueológico (Fioretti et al. 2020: 2) como escultórico (Loaiza Carvajal 2020: 234). La posibilidad de alcanzar medidas rigurosas e integrales de la tecnología actual, de hecho, permiten replantear de manera reiterada la documentación necesaria y obtener elaboraciones técnicas con diferentes grados de resolución. A partir de estudios previos (Morena et al. 2019: 135) y análisis comparativos SfM (Rodríguez-Navarro 2012: 100; Gil-Piqueras et al. 2019: 645), esta contribución tiene como objetivo analizar no solo las oportunidades que garantizan las nuevas tecnologías de bajo costo en el campo del patrimonio escultórico (con texturas homogéneas, formas geométricas simples y materiales no reflectantes), sino también evaluaciones comparativas de levantamientos de un mismo objeto en función de distintas variables. Tanto tomando como variables los instrumentos, como los tiempos y, sobre todo, los operadores. Los avances logrados, tanto en hardware como en software, en el campo de la topografía hacen que sea cada vez más fácil generar modelos incluso a partir de trabajos de campo que no están debidamente planificados con un propósito fotogramétrico profesional.

La posibilidad de utilizar fotos adquiridas mediante tecnologías hoy día ampliamente utilizadas, cámaras compactas y teléfonos inteligentes (Shults, 2017: 481), así como la disponibilidad de software de bajo costo y fácil de usar, de hecho, permite perseguir resultados razonablemente precisos. Esto asegura digitalización más extensiva del patrimonio (Tabone, 2019: 48), aunque solo sea con fines de divulgación: visualización web, recorridos virtuales, así como formas innovadoras de catalogar y almacenar documentos en bases de datos de historia eminentemente gráfica, técnica y arquitectónica. El objetivo de este trabajo es el análisis y la comparación de modelos tridimensionales del Monumento a la Tollerancia (Figura 1). La atención se centra en este monumento a raíz de la recopilación de muchas experiencias de toma de datos realizadas por diferentes sujetos (incluso no expertos) obtenidas a lo largo de varios años con diversos instrumentos (FARO Focus^{3D} X330, Nikon COOLPIX L11 y Apple iPhone 11) y procesadas con distintos softwares (SCENE, PhotoModeller, Metashape, eyescloud3D, 3DF Zephyr y ReCap Photo). Para comprobar la exactitud de estos datos se han realizado varios análisis. El primero de ellos para evaluar la diferencia que consiguen los distintos softwares en el tratamiento de datos provenientes de una misma instrumentación. Un segundo análisis, se realiza comparando los mejores resultados obtenidos

con dos instrumentos diferentes procesándolos con un mismo software. Finalmente, la necesidad de probar las tecnologías comerciales que normalmente se usan para la restitución de modelos, implicaba inevitablemente la comparación de los datos con los adquiridos con un escáner láser caracterizado por una alta precisión y exactitud (Figura 2). Si bien los resultados de esta investigación se logran con rigor científico, los datos de esta investigación se presentan aquí con una intención predominantemente informativa.

1.1 INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

El Monumento a la Tolerancia es una escultura emblemática ubicada en Sevilla y firmada por el escultor Eduardo Chillida (San Sebastián, 1924-2002). Fue inaugurado en 1992, con ocasión de la Exposición Universal de Sevilla, en memoria del Edicto de Granada, con el que los judíos fueron expulsados de la península por los Reyes Católicos.

La obra, financiada por la Fundación Amigos de Sefarad, está ubicada en el “Muelle de la Sal”, sito en el Paseo del Alcalde Marqués del Contadero, junto al Puente de Isabel II, conocido popularmente como Puente de Triana (Rabe 2014: 137). Fabricado íntegramente en hormigón armado, tiene a una altura total de unos 4 m y una anchura máxima de 12 m. Como contraste al pasado violento y doloroso, se presenta como un gran abrazo entre diferentes culturas, para fomentar la comprensión y la tolerancia (Matos 2015: 99). A pesar de su aparente sencillez, visto desde diferentes perspectivas, siempre asume diferentes configuraciones. Según se mire sobresale el brazo izquierdo, otras veces predomina el derecho. Aparentemente cada parte de la obra es “siempre diferente pero nunca igual” (Chillida 2016: 103). La ausencia de uniformidad visual de la obra es el emblema mismo de la tolerancia, no existe un punto de vista único, solo respeto para que la diversidad que pueda convivir. A pesar de su importancia artística y simbólica, tras de varios actos vandálicos, la escultura tuvo un aspecto sumamente degradado, por lo que fue necesario limpiarla y consolidarla. Esto, sin embargo, no fue suficiente para limitar los actos vandálicos que se vienen repitiendo en la estructura, subrayando aún más la necesidad de documentar, detectar y digitalizar nuestro patrimonio para preservarlo, divulgarlo y catalogarlo, generando un archivo de datos disponible para cualquier eventualidad.

2. ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

Los datos adquiridos por diferentes operadores y en diferentes momentos fueron obtenidos por tres instrumentos diferentes y procesados con varios programas, que se describen a continuación (la

información contenida se toma principalmente de los respectivos manuales). También es fundamental subrayar que algunas fotos fueron realizadas por personal sin experiencia y solo con fines documentales. La elección de programas fotogramétricos para el procesamiento de datos recayó en aplicaciones profesionales pero fáciles de usar, donde la interacción con el usuario durante el proceso es muy limitada. En particular, los programas empleados son Metashape de Agisoft y 3DF Zephyr de la italiana 3DFLOW. Son aplicaciones que operan en Structure for Motion (SfM) para procesar datos orientados a la obtención semi-automática de modelos fotorrealistas tridimensionales. En el segundo caso, se han seleccionado eyescloud3D y ReCap Photo. El primero consiste en una aplicación conectada a la nube, accesible tanto a través del teléfono móvil como del ordenador, de la firma española eCapture3D. Dicha aplicación genera automáticamente la nube de puntos y la malla, sin la necesidad de ordenadores de alto rendimiento y, finalmente, proporciona la visualización del modelo a través de una plataforma en la Red. Con una interfaz muy simple, también permite diferentes iteraciones de medición y edición, así como la posibilidad de georeferenciar y descargar el modelo. ReCap Photo es un servicio incluido con ReCap Pro de Autodesk, que permite procesar fotos para la generación de nubes de puntos, mallas y ortofotos. Con una sencilla interfaz gráfica, también en este caso el proceso de los datos se realiza en Internet, permitiendo la edición de los datos una vez procesado el modelo. Sin embargo, dadas las características del monumento y los primeros planos, los mejores resultados se obtuvieron operando en modo objeto, que genera automáticamente una malla texturizada. El flujo de trabajo con el uso del software Metashape y 3DF Zephyr se basa principalmente en cinco pasos consecutivos: orientación de las cámaras y alineación de las imágenes con la generación de una nube dispersa, detección de puntos de control (en nuestro caso extraídos del modelo del escáner láser) para localizar y escalar el modelo, construcción de nubes densas, generación de mallas y texturización de modelos. A diferencia de los casos anteriores, con las aplicaciones eyescloud3D y ReCap Photo se procedió a seleccionar las fotos e iniciar el procesado y, solo después de la generación del modelo, pudimos escalarlo y exportarlo. A nivel general, las principales dificultades encontradas fueron: la alineación de las cámaras, a pesar de una superposición suficiente de alrededor del 70% tanto con COOLPIX L11 como con iPhone 11, y la ausencia de dianas naturales al tratarse de un monumento caracterizado por una textura homogénea y una forma geométrica simple. Los puntos de control seleccionados se extrajeron del modelo de escáner láser. Se identificaron las coordenadas de 7 puntos para ubicar y escalar los modelos fotogramétricos (Figura 3). Finalmente, la ausencia de pértiga o de un vuelo de UAV imposibilitó la captación de la parte superior del modelo, por lo que

todos los datos procesados tienen lagunas en la parte superior. Las tablas de las figuras 4 y 5, esquematizan el procesamiento de datos principales obtenidos durante la fase de alineación, nube densa y generación de malla respectivamente.

2.1 FARO FOCUS^{3D} X330

Se trata de un láser de diferencia de fase producido por la empresa CAM2. Se caracteriza por su peso ligero (solo 5 kg) y compacidad, propiedades que garantizan un cómodo manejo del dispositivo facilitando el desplazamiento entre las distintas posiciones. El campo de visión cubre una apertura de 360° horizontalmente y 300° verticalmente, con un rango de adquisición mínimo de 0,6 m y máximo de 330 m (Gollob et al. 2019: 4). El sensor fotográfico, que permite la adquisición de color durante el escaneo, está integrado en el sistema y permite minimizar los errores durante el procesamiento de datos. Para facilitar y agilizar la adquisición de escaneos, realizada en 2015, se realizó una primera pre-adquisición de 360° para cada estación, con una distancia entre puntos de 15,35 mm a 10 m (resolución 1/10 y calidad 4×). Seguidamente se realizó una adquisición de mayor resolución (1/4 con la misma calidad 4×), con una distancia de puntos de 6,14 mm a 10 m y con la adición de información colorimétrica. La gestión y el procesamiento de datos se realizaron en 2020 con el software propietario del escáner, SCENE (versión 2019.0.0.1457). La información recopilada directamente del instrumento durante la adquisición (altímetro, brújula, inclinómetro y GPS) garantizó una gestión más sencilla de los 7 escaneos utilizados para generar la nube de puntos de referencia. Tras un primer registro manual, mediante la identificación de elementos homólogos en los escaneos, siguió un registro automático de nube a nube con el objetivo de realizar mejoras en el registro espacial global del modelo. La nube generada tiene unos 58.000.000 de puntos, con un error de punto medio de unos 8 mm y una superposición del 20% de los escaneos. Finalmente, a través de un *Clippin*box, se ha seleccionado el área de interés para exportarla y compararla con otro software independiente.

2.2 COOLPIX L11

Cámara Nikon compacta con sensor CCD de 1/2,5" de 6,2 MP, distancia focal variable 6,2-18,6 mm y una apertura focal de f/2,8-5,2. Su simplicidad de funcionamiento y su particular sensibilidad a la luz con un ISO 800 hacen que sea fácil de usar incluso para personas no profesionales. Las adquisiciones fotográficas realizadas *in situ* en el 2008 se realizaron únicamente con fines de documentación y, por tanto, sin el uso de dianas. La inspección concluyó con la adquisición de 77 fotografías de la escultura desde diferentes ángulos. El procesamiento Metashape, realizado mediante el establecimiento de la máxima

precisión (resolución máxima de las fotos) y un límite de puntos clave (*keypoints*) de 40.000, finalizó con la alineación de 74/77 fotos. A continuación, se creó una nube densa, que consta de aproximadamente 42.000.000 puntos y un modelo de malla de 8.000.000 de polígonos. En el caso de la aplicación 3DF Zephyr, los mejores resultados se lograron estableciendo, durante la fase de orientación de las cámaras, límite de puntos clave (*keypoints*) de 7.500 y una resolución del 100% de las imágenes garantizando una alineación de 70/77. Los resultados obtenidos son una nube densa de unos 2.000.000 de puntos y una malla poligonal de tantas caras, caracterizada por varios huecos especialmente cerca del brazo izquierdo del monumento.

El procesamiento de datos a través de la aplicación eyescloud3D dio mejores resultados con la selección de solo 50/77 fotos, generando una nube de alrededor de 1.500.000 y una malla de 170.000 polígonos, con presencia de varios huecos dispersos en el modelo. Finalmente, los datos también se procesaron con ReCap Photo, lo que permitió generar un modelo de malla de unas 870.000 caras, pero con varias deformaciones especialmente cerca de los brazos.

Otro software, implementado en 2008, para administrar estos datos fue PhotoModeler v.6. En este caso, la calibración de la cámara se realizó independiente respecto al levantamiento: consiste en un proceso donde es necesario tomar fotos (manteniendo fijos los parámetros de la cámara) de una cuadrícula con una serie de puntos con coordenadas teóricas proporcionadas por el software. La comparación de estos puntos con la realidad captada por nuestra cámara nos permite definir el grado en que las imágenes son deformadas por la lente, para su posterior corrección. Sucesivamente, se procede en la generación de la escena tridimensional con la detección manual de puntos homólogos entre las imágenes, a partir de ahí se calculan las posiciones de las cámaras en el espacio. Este es un proceso arduo que los sistemas SfM (disponible también en las versiones modernas de Photomodeler) han mejorado enormemente. Una vez orientadas todas las imágenes necesarias, se construye la maqueta sobre la que, posteriormente, se definen las superficies que representan el monumento. Por último, las texturas se proyectan sobre las superficies, asegurando que provengan de las imágenes en una situación más ortogonal, y sin obstáculos, para una mejor calidad fotorrealista.

2.3 IPHONE 11

Smartphone diseñado y fabricado por Apple caracterizado por un sensor CMOS 1/2,55" y una doble cámara de 12 MP, una gran angular y otra ultra gran angular. Muy popular en los últimos años, garantiza la producción de fotografías de buena calidad incluso por usuarios sin experiencia. La toma de datos, una vez más realizada sin una finalidad propiamente significativa y sin dianas, se realizó en el 2020 constó de 83 fotografías.

Los parámetros utilizados en Metashape, muy similares a los anteriores, con máxima precisión y resolución de las fotos durante la fase de orientación, permitieron obtener una alineación de 82/83 fotos. A pesar del mayor número de adquisiciones, la nube generada tiene un número de puntos igual a 38.000.000 y una malla de unas 8.300.000 caras similar al modelo con la Nikon. De la misma manera que 3DF Zephyr, los mejores resultados se obtuvieron estableciendo valores límite de *key points* en 7.500 y resolución máxima de foto, asegurando una alineación de 82/83 fotos, un modelo de nube con 1.050.000 y una malla de aproximadamente 12.000.000 caras. Utilizando 83/83 fotos se pudo proceder a la creación del modelo también en eyescloud3D, se generó una nube de aproximadamente 2.000.000 y una malla de 405.000 polígonos. Finalmente, utilizamos ReCap Photo con la generación de una malla compuesta por aproximadamente 1.000.000 de polígonos y deformaciones evidentes en varias partes del modelo.

3. COMPARACIÓN

Los datos procesados se compararon para validar los resultados obtenidos. Se realizó un primer análisis verificando los mejores resultados obtenidos utilizando el mismo instrumento y procesando los datos con diferente software. Posteriormente, en base a lo obtenido, se evaluaron las principales diferencias entre dos de los mejores modelos realizados con COOLPIX L11 y iPhone 11 y, finalmente, se validó todo comparando el modelo con el registrado por escáner láser. Sin embargo, mientras que en el caso de aplicaciones profesionales como Metashape y 3DF Zephyr la comparación puede basarse en datos estadísticos extraídos y procesados directamente por el software durante el tiempo de elaboración, no se puede realizar lo mismo en el caso de las dos aplicaciones restantes. Para hacer más comparaciones, los modelos se exportaron en formato universal y se compararon en un software independiente gratuito, CloudCompare V.2.10.2. Para una comparación entre nubes densas, se utilizó el "cálculo de distancia de nube a nube" (C2C). Es la forma predeterminada de calcular la distancia entre nubes densas en el software: para cada punto de la nube comparada, busca el punto más cercano en la nube de referencia y calcula su distancia (euclidiana). En el caso de la comparación de la nube de puntos y la malla, necesariamente deberíamos haber procedido con el "Cálculo de la distancia de nube a malla" (C2M) en el que, para cada punto de la nube comparada, el software debe identificar el triángulo más cercano en la malla de referencia. Sin embargo, al operar de esta manera, el software identificará automáticamente la malla como elemento de referencia. Para invertir los modelos y considerar la nube generada por Metashape como referencia, fue necesario muestrear primero la malla y, solo entonces, compararla.

3.1 COMPARACIÓN DE SOFTWARE

Las tablas (Figura 6 y 7) muestran, tanto para COOLPIX L11 como para iPhone 11, los errores de reproyección de las coordenadas x, y, z para cada punto de control utilizado en los dos primeros programas (la posición de los puntos es visible en la figura 3). Como se puede observar, en el caso de la cámara Nikon, el software 3DF Zephyr tiene valores de desviación ligeramente superiores a Metashape, alcanzando un valor medio de error de unos 1,50 cm respecto a los 1,38 cm de Metashape, con valor máximo de 3,0 cm para el punto 3.

Más diferencia, en cambio, se observa, en el caso de la cámara del iPhone 11, con el punto 2 que alcanza un error de unos 5,00 cm en el caso del software 3DF Zephyr.

Se ha realizado una comparación adicional, como se especificó anteriormente, utilizando CloudCompare, para evaluar las desviaciones existentes entre las superficies del modelo (Barba et al. 2019: 149). La nube de puntos Metashape obtuvo los mejores resultados y se tomó como referencia para comparar con el resto de modelos obtenidos mediante software. En las figuras 8, 9 y 10 es posible visualizar el resultado del análisis anterior. La columna de la derecha de la imagen representa el rango de desviación existente entre puntos pertenecientes a dos modelos diferentes que está representado en falso color. Las desviaciones máximas (en rojo) alcanzan valores iguales a 10 cm y son visibles en la primera comparación solo en una porción del brazo izquierdo.

Satisfactorios son también los resultados obtenidos con el software eyescloud3D. En cambio, desviaciones obvias se muestran principalmente en el modelo conseguido con ReCap Photo. Los resultados de la comparación punto a punto de los modelos generados por los diferentes programas utilizados para procesar los datos de la COOLPIX L11 se han mostrado esquemáticamente en los gráficos donde en el eje X están los valores de desviación en m, y en el eje Y, el número de puntos a los que corresponde este valor (Figura 11 y 12).

A la vista de lo expuesto, los mejores resultados se obtuvieron con 3DF Zephyr que tiene el valor de desviación estándar más bajo (1,3 cm), sin embargo, también se lograron buenos resultados en el caso de eyescloud3D con valores de desviación estándar cercanos a 1,8 cm, así como la obtención de un modelo completo sin huecos importantes. Menos satisfactorios son los generados por ReCap Photo con una desviación estándar que alcanza un valor de unos 3 cm.

El pico de la curva se acerca a 0,15 cm para la comparación con 3DF Zephyr y el análisis del gráfico muestra como el 90% de los puntos tiene una desviación menor a 2 cm. En el caso de eyescloud3D, la mayoría de los puntos tienen valores de desviación de 0,80 cm con alrededor del 70% de desviación menor a 2 cm. Se han realizado más comparaciones con el iPhone 11. Del análisis de la figura 13, se puede ver que la

comparación de los modelos Metashape y 3DF Zephyr tiene más desviaciones que la comparación anterior con Nikon. Los valores de aproximadamente 10 cm ocurren principalmente cerca del brazo izquierdo, se confirman por una alineación incorrecta en el modelo 3DF Zephyr.

Mejores resultados, en este segundo caso, vinieron de la aplicación eyescloud3D, que permitió generar una nube densa con ligeras desviaciones respecto del modelo de Metashape, alcanzando un valor de desviación estándar de aproximadamente 1,4 cm (Figura 14). Una vez más, la distribución se muestra esquemáticamente en el gráfico visible en la figura 15, con las frecuencias más altas cercanas al valor de 0,15 cm y alrededor del 80% de puntos con desviación menor a 2 cm. Por lo demás, ReCap Photo ha devuelto un modelo con una fuerte desviación respecto del modelo de referencia, no solo en el brazo, sino en el modelo general, alcanzando en algunos puntos diferencias significativas de más de 10 cm (Figura 16).

3.2 COMPARACIÓN DE INSTRUMENTOS

Como se mencionó anteriormente, se realizó una comparación adicional entre los resultados obtenidos con Metashape a partir de los datos adquiridos con dos instrumentos diferentes COOLPIX L11 y iPhone 11. El análisis del error de reproyección para las coordenadas de los puntos de control, visible en las tablas anteriores en la figura 6 y 7, muestra un valor superior para los datos procesados con el smartphone, así como una nube de puntos y un modelo de malla, con algunas lagunas. El estudio de la desviación entre las dos superficies se realizó con CloudCompare, operando con el algoritmo C2C. Por lo que podemos ver en la figura 17, los dos modelos tienen una distribución bastante similar. La desviación estándar que se puede extraer de la comparación es igual a un valor de 1,7 cm y el gráfico de distribución alcanza el punto más alto cerca del valor de 0,40 cm. Estos resultados, por tanto, permiten confirmar la similitud existente entre los dos modelos, de hecho, más del 90% de los puntos tienen una distancia menor a 3 cm salvo algunos presentes principalmente en los brazos y en los bordes del monumento.

3.3 VALIDACIÓN DEL MODELO

Para probar los resultados obtenidos, se realizó una comparación adicional comparando la nube extraída de Metashape, realizada a partir de los datos adquiridos con la COOLPIX L11, y los obtenidos con el láser FARO Focus^{3D} X330. La elección recayó en el modelo Nikon por arrojar los mejores resultados, tanto métricos como geométricos, presentando una nube completa sin lagunas significativas. El análisis se ha vuelto a realizar con el algoritmo C2C de CloudCompare. Los resultados perseguidos se pueden ver en la figura 18. Las desviaciones superficiales con valores cercanos

a los 10 cm son casi nulas salvo en algunos puntos cercanos a los bordes, principalmente debido al ruido de las nubes de puntos.

La desviación estándar que se desprende de esta comparación alcanza valores cercanos a 1,3 cm, teniendo el 90% de los puntos un valor inferior a 3 cm. El gráfico muestra la mayor intensidad de puntos con una desviación de aproximadamente 0,35 cm.

4. CONCLUSIÓN

Antes de proceder con las conclusiones, es necesario resaltar y precisar las diferencias más importantes entre las tecnologías utilizadas. Primero, las diferentes herramientas en la fase de adquisición de datos. En el caso de los levantamientos fotogramétricos, optamos por dos instrumentos económicos, fáciles de usar y ampliamente disponibles en el mercado. Estas características permiten a los operadores no especialistas acceder a equipos que ofrecen resultados satisfactorios para las actividades fotogramétricas, sin apenas inversión, obviamente, considerando los objetivos de cada proyecto.

El escáner láser, en cambio, es una herramienta tecnológica y especializada con un precio muy superior a los anteriores. Puede adquirir densas nubes de puntos (976.000 puntos por segundo, según especificaciones de FARO) que dificultan su manipulación, interpretación y gestión sin un equipo y un software profesional. Otra aclaración a considerar es la característica de la escultura, que presenta una textura homogénea y una forma geométrica simple. Tales peculiaridades, de hecho, dificultan que el software fotogramétrico alinee y oriente las imágenes, más aún si la toma de datos está realizada por un usuario sin experiencia y sin la colocación de dianas. Finalmente, en el análisis realizado decidimos implementar dos programas que operan en la nube donde la gestión de parámetros es casi nula y, consecuentemente, manejables por un público cada vez más amplio.

Analizando los datos obtenidos es posible ver cómo, con la llegada de numerosas tecnologías comerciales de bajo costo, la comparación de algunos modelos (Metashape obtenido con fotos Nikon vs. Scene FARO) ha generado diferencias satisfactorias en la nube de puntos. Lo mismo puede decirse de la nube de puntos generada por eyescloud3D para los datos del iPhone 11. Los dos modelos, no solo se ven completos y sin espacios, sino que las desviaciones de las nubes de puntos respecto a las de referencia son aceptables. En el caso del resto de modelos, se puede destacar la presencia de errores mayores, pero aún aceptables como datos a utilizar para la generación de modelos para visualización vía web o para impresiones 3D (Figura 19), sobre todo dada su mayor ligereza y manejabilidad. Tras los grandes avances conseguidos en el campo fotogramétrico, ha quedado probado que es posible conseguir resultados cada vez más satisfactorios, compensando a menudo

los déficits instrumentales o la inexperiencia de los operadores. A nivel general, es posible apreciar un alto nivel de desfase entre los modelos en las áreas de los brazos del monumento debido ciertamente a la ausencia de puntos de control con estación total en el levantamiento fotogramétrico realizado. Por tanto, es un aspecto de fácil solución. Sin embargo, esta decisión se ha tomado en función del objetivo inicial de comparar herramientas de amplia difusión baratas y fáciles de usar por personas no expertas. El modelo tridimensional del escáner láser, como se esperaba, proporciona información métrica precisa y un alto grado de detalle de las superficies representadas. Este modelo se puede conservar como una verdadera copia digital del monumento real. En definitiva, será una valiosa base de datos desde la que analizar o realizar más estudios en gabinete. Sin embargo, de lo expuesto anteriormente se puede inferir cómo el potencial de estas tecnologías, aunque sean de bajo costo, muestra un presente y un futuro prometedor para la conservación de la cultura y el patrimonio. En los últimos años, el potencial de la fotogrametría unido a los avances en visualización computacional SfM y a la accesibilidad de la tecnología para el gran público, nos brindan la oportunidad de generar resultados satisfactorios en esta área, siempre en consonancia con los objetivos perseguidos, teniendo en cuenta que sin uso de puntos de control, equipos y procedimientos profesionales los resultados no son aptos para fines métricos o científicos.

Como se sabe la fase más compleja de la fotogrametría SfM es la toma de las fotografías, sin embargo, en el trabajo se quiso expresamente evaluar fotografías tomadas por no profesionales y así constatar las presencias de huecos, aberraciones, etc. Así mismo, para aprovechar la posible economía y sencillez de la fotogrametría SfM, se trabajó con softwares de consumo (un desarrollo posible sería utilizar otros softwares libres también) y cámaras con objetivos de distintas calidades. En este sentido, hemos de hacer algunas consideraciones al respecto: por ejemplo, las desviaciones que se muestran en el artículo – muchas no admisibles – se refieren a un elemento arquitectónico pequeño y no permiten generalizar los resultados en el caso de una gran construcción (donde, por otro lado, el levantamiento debería llevarse a cabo sólo por profesionales).

Como conclusión, se observa que el uso por no profesionales puede traer consigo resultados de baja calidad que, aunque puedan ser usados para el consumo, nada a que ver con los levantamientos profesionales, científicos, donde el operador maneja muchos más factores, todos ellos complejos, pero que garantizan la calidad, rigor y fidelidad de los modelos obtenidos. Todo esto nos obliga a enfatizar el aporte de ingenieros y/o arquitectos, también con recursos automatizados. Para finalizar podemos argumentar que hacemos el levantamiento no con la fotogrametría SfM, que es un instrumento, sino con la cabeza, con el cerebro, con la mente.