

HALF A CENTURY DOCUMENTING THE ARCHITECTURAL HERITAGE WITH PHOTOGRAMMETRY

MEDIO SIGLO DOCUMENTANDO EL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO CON FOTOGRAMETRÍA

Antonio Almagro Gorbea

Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Madrid, España, aalmagro@cica.es

Abstract

This article intends to review the evolution of photogrammetric techniques during the last fifty years from the author's experience in activities developed both in the field of monumental restoration and architectural research. The technological progress achieved in these years allows us to be optimistic about the future, estimating what has been accomplished, but being aware of the enormous work remaining to be done, which is endless since, as a consequence of the technological development itself and the need to advance knowledge of our heritage, imposes a continuous revision and improvement of the documentation process.

Keywords: Analog Photogrammetry, Analytical Photogrammetry, Digital Photogrammetry, Technological Evolution.

Resumen

En este artículo se hace un repaso de la evolución de las técnicas fotogramétricas durante los pasados cincuenta años desde la experiencia del autor en actividades desarrolladas tanto en el campo de la restauración monumental como de la investigación arquitectónica. El progreso tecnológico producido en estos años nos permite mirar con optimismo hacia el futuro, sin dejar de valorar lo realizado, pero siendo conscientes de la tarea ingente aún por realizar, que nunca tendrá fin pues el propio desarrollo tecnológico y la necesidad de mejorar el conocimiento de nuestro patrimonio nos impone una continua revisión y perfeccionamiento de la documentación.

Palabras clave: Fotogrametría Analógica, Fotogrametría Analítica, Fotogrametría Digital, Evolución Tecnológica.

1. INTRODUCTION

Heritage conservation must always be substantiated upon its knowledge. Planimetric surveying is undoubtedly the most effective and valuable instrument of knowledge and analysis of the architectural heritage that we have so far. Architectural representation through the descriptive geometry methods established

provides us with information on the shape and dimensions of an architectural object to which we can then add graphic techniques to illustrate about textures and colors. Although the new three-dimensional representation technologies can enrich that knowledge, the floor plans and sections remain irreplaceable means towards understanding and synthetically analyzing the formal and spatial reality of a building.

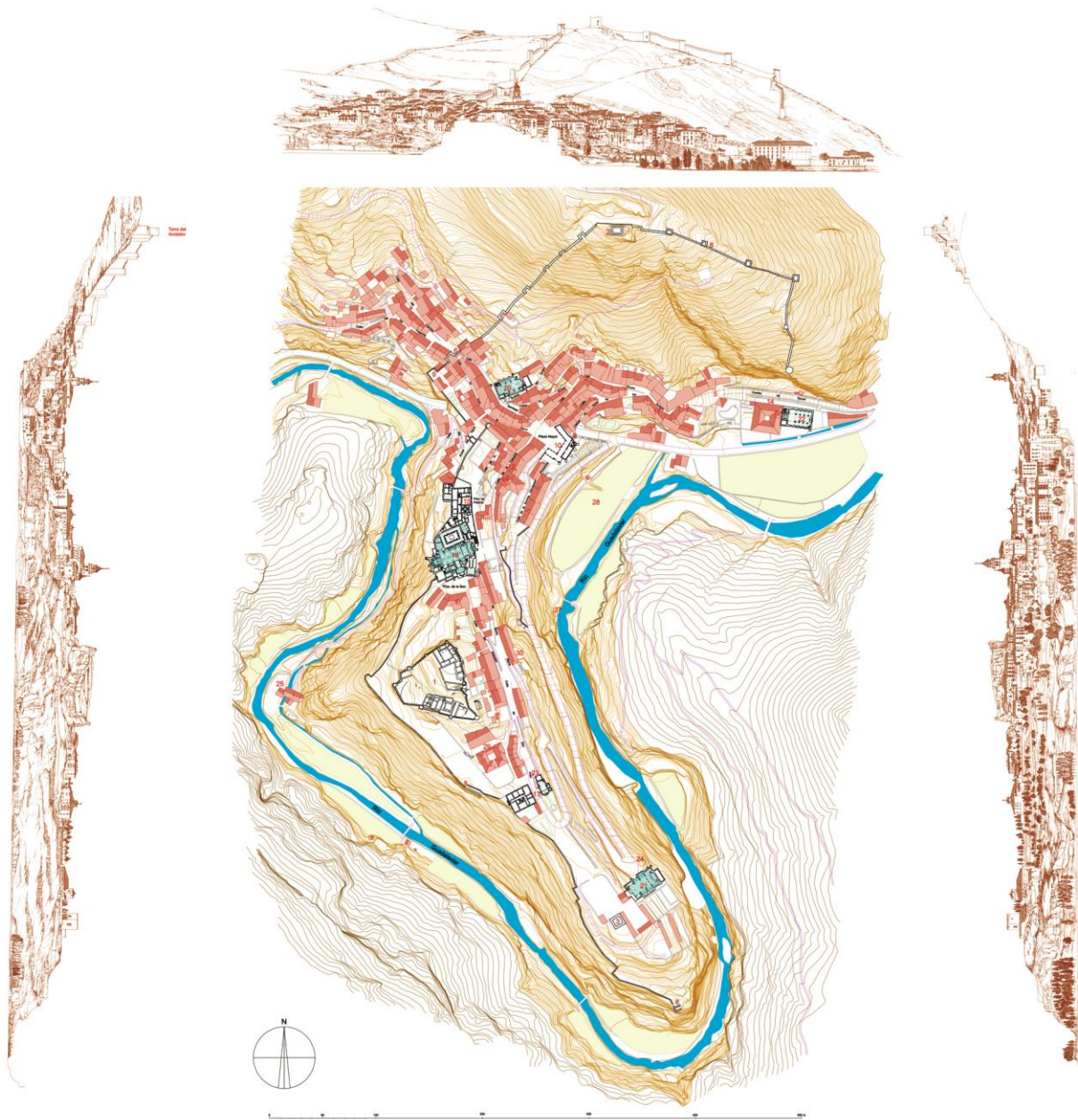


Fig. 1. Topographic map and elevations of the historical complex of Albarracín using aerial photogrammetry and manual redrawing.

I should say that I have come to this conviction through a process largely conditioned by negative experiences, that is, seeing how the absence of good planimetric documentation prevented me or

made it difficult to achieve adequate knowledge of a building and, thus, how it brought about additional difficulties when carrying out study and conservation tasks. One of my first experiences,

which undoubtedly made an impression on my subsequent activity, was the reassembly of the Debod Temple in Madrid (Almagro 1994). The scarce and sometimes contradictory planimetric information provided, together with the dismantled temple's blocks, made the reconstruction quite challenging, having to resort to uprisings published in old works and that led me to address a complete planimetry of the temple once traced, where I could experience the difficulties that it involves this type of work done based solely on manual means, that is, with measuring tape and, at most, a plumb bob or a level. I also found these same difficulties in my first restoration works' surveys, where I managed to draw the floor plans, not free from errors, but the measurement of heights and unattainable elements in the elevations and sections was generally difficult and sometimes impossible.

2. THE TIMES OF ANALOG STEREOGRAMMETRY

Through these first two initial experiences, I had my first contact with photogrammetry. A family friend, a geologist, who discovered archeological sites using the aerial photographs he employed in his work, explained to me for the first time how topographic plans were made from these photographs. In 1972, the *Dirección General de Bellas Artes* (General Directorate of Fine Arts) commissioned me to carry out a study of the Albarracín Historical Site, or what it was known as an "Urgent Protection Plan" that was intended to be a "special management plan" when that figure did not yet exist in the urban planning legislation. The importance of the topography of the location of this site, which made the protection of the external visuals and the conservation of volumetry essential in that study, led me to think about using that technique to generate a good topographic plan with contour lines and reliable altimetric information. With the support of technicians from the *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas*, CEDEX (Center for Studies and Experimentation of Public Works), I commissioned aerial photos on the largest scale that could possibly be obtained (1/3,500), and using a Wild A8 analog stereoplotter they provided me with a 1/500 scale floor plan of the whole set with contour lines every 0.50 m, and a drawing of all roof tops with altimetric dimensions of all singular elements (eaves, ridge,

etc). I believe that Albarracín was the first historical site in Spain that provided information of this kind (Fig. 1). I must admit that I invested nearly the entire available budget to generate that plan, so I had to complete the rest of the study at my own expense. From this experience on, and almost simultaneously, I undertook the documentation of the different archaeological sites in which I had consolidation works entrusted, such as Numancia, Azaila, Clunia or Segóbriga, commissioning the appropriate photogrammetric flights and the corresponding plottings.

Almost at the same time, I had a full contact with photogrammetry, its principles and its possibilities: the manner in which the geometric properties of the perspective inherent in the photographic image allow us to reconstruct the projection beams and how, from the beams of two photographs obtained from different positions it is possible, by intersecting them, to determine the spatial position of all the points recorded in both images; furthermore, stereoscopy helps to easily identify homologous points. In 1973, thanks to the specialization restoration course that I attended in Rome, organized by the International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property (ICCROM) and the Faculty of Architecture of the University of *La Sapienza*, I had the fortune to meet and study with two of the maximum drivers of the technique applied to heritage: Maurice Carbonnell, engineer from the French *Institut Géographique National* (IGN) and Hans Foramitti, from the *Bundesdenkmalamt* (Federal Office of Monuments) of Austria, who introduced me to the theory and practice of this technique applied to architectural documentation. There I learned, among other things, the rudiments of photographic shots using metric cameras and the possibility offered by the three-dimensional measurement system as well as obtaining projections on different planes. I was especially acquainted with the works of the French IGN and its urban elevations drawn from aerial photos and also with the systematic documentation work carried out by the *Bundesdenkmalamt* (Carbonnell 1989) that immediately made me think about its enormous utility and its application in Albarracín. In the summer of that same year, I organized a photographic shooting mission where, employing a Zeiss Ikon SMK120 metric double camera

owned by the ICCROM, we obtained more than one hundred stereoscopic photographs of Albarracín, the ruins of Segóbriga and the Mora de Rubielos castle (Almagro, 1973). With the experience gained and the photographic material gathered, we were able to subsequently plot the

general elevations of the town of Albarracín, as well as different constructions of the same site (Almagro 1987) and the Segóbriga theater and amphitheater, used subsequently for restoration work purposes.

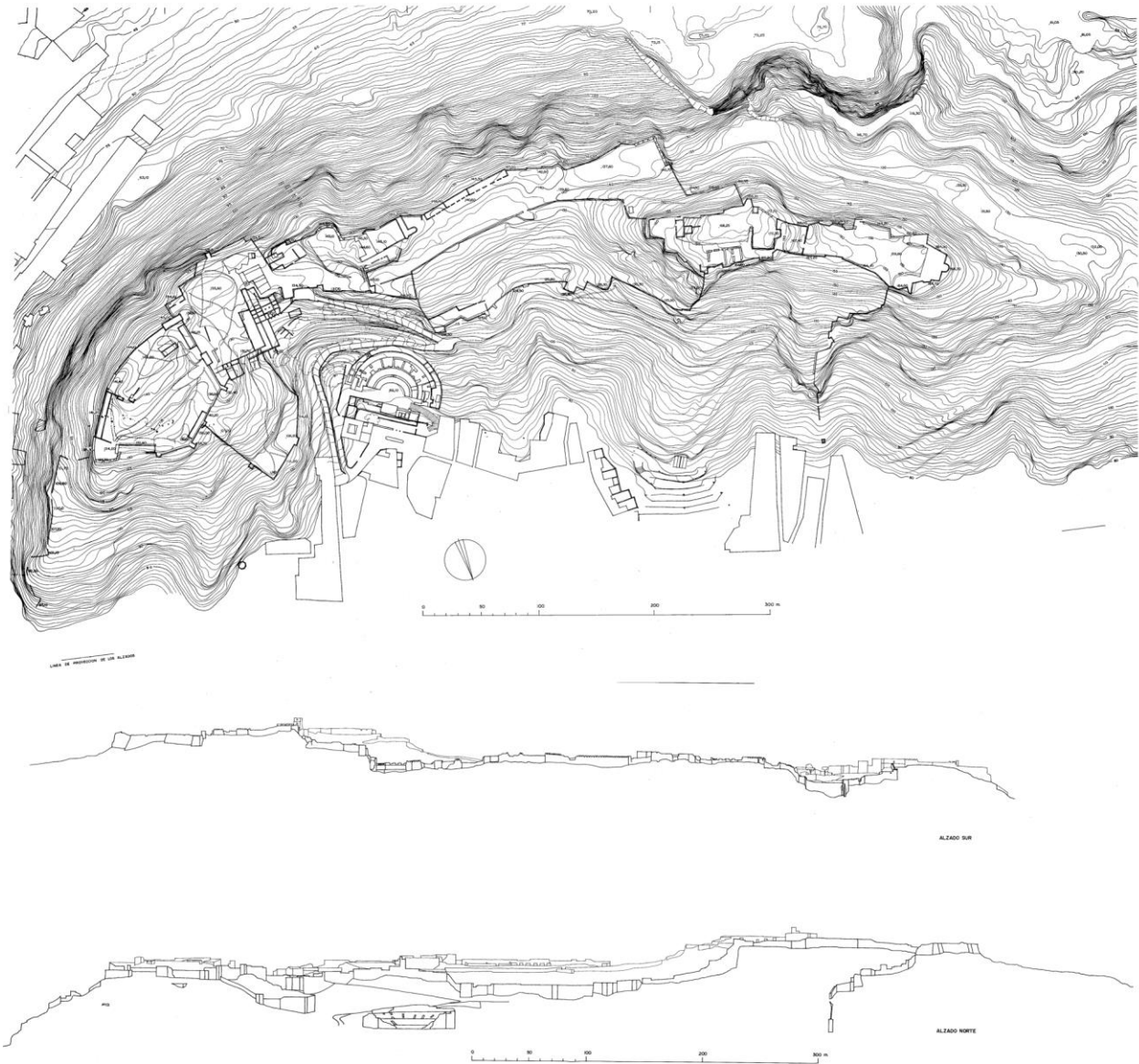


Fig. 2. Topographic map and elevations of the Sagunto castle using aerial photogrammetry.

From that moment, I turned to the use of this technique in all the projects in which I had the opportunity to participate, resorting to the collaboration of organizations or companies that had adequate equipment. I will highlight the collaboration with the Photogrammetry and Photointerpretation Service of the *Universidad Politécnica de Madrid* located at the School of Agricultural Engineers. This service owned a Zeiss Jena Topocart B stereo-plotter with which it was

possible to obtain projections of the photogrammetric model on the different reference planes of the coordinate system, allowing to draw floor plans, elevations and profiles. Fruit of this collaboration were the surveying works carried out in the Mora de Rubielos castle, as well as those of Sagunto's castle and Roman theater (Fig. 2 and 3) (Almagro 1978), which were later used, much to my regret, in the unfortunate intervention carried

out at the site, leaving these drawings as a testimony of the previous state. The documentation project of the Amman Citadel (Jordan) deserves special mention, having counted on the collaboration of the Spanish Air Force that sent a plane with two cameras for aerial photogrammetric shots to Jordan. Taking advantage of the trip, we transported the ground photogrammetry and topography equipment as

well, carrying out a complete survey that combined aerial and terrestrial photographs (Almagro 1988). During that expedition, numerous archaeological sites in that country were documented. In all cases, we took advantage of the possibilities of obtaining different projections despite the strong limitations that the analog stereo-plotters entailed.

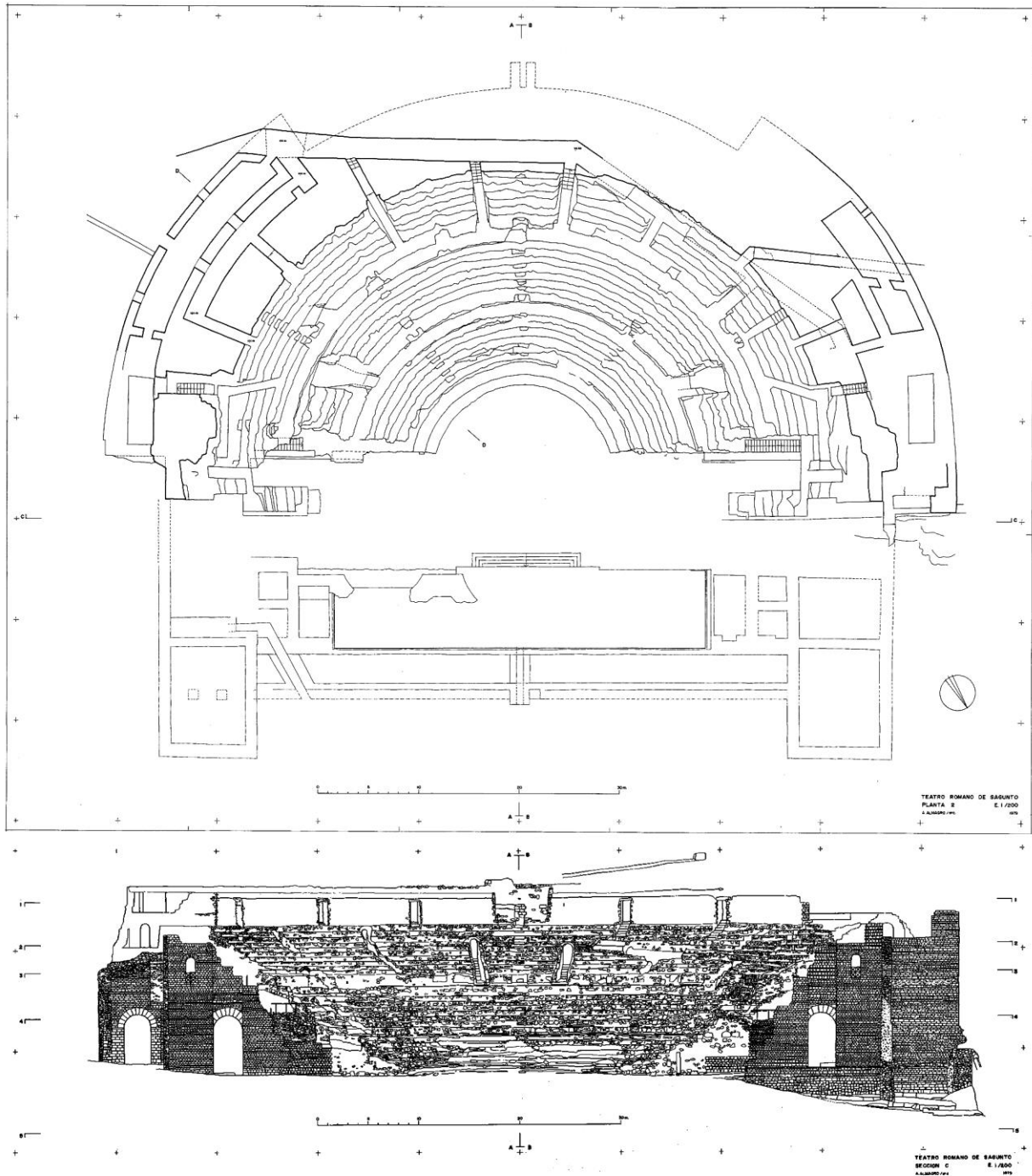


Fig. 3. Plan and elevation of the Roman theater of Sagunto using terrestrial photogrammetry.

One of the lessons I learned from these experiences was that photogrammetry was a very efficient instrument for measurement, but it did not solve on its own the representation and graphic problems of the final drawings. Being used to resort to companies and technicians normally dedicated to topographic works and used to map the land, but not to represent historical architectural works, I found that the drawings coming out of the stereo-plotter were very poor. Therefore, I confirmed that, in order to draw architecture, it is essential to understand the nature and characteristics of what is being drawn. The mere contemplation of a photo does not allow the observer to correctly draw what appears there if one does not have enough understanding of the subject. At that time, all I could do was to redraw the plotting properly, interpreting what we intended to represent. This experience would help me later in the selection of collaborators when I had the chance to have the plotting instruments exclusively dedicated to architectural surveying. I soon understood that it was easier and faster to learn how to handle a photogrammetry plotter than to draw and properly represent architectural works.

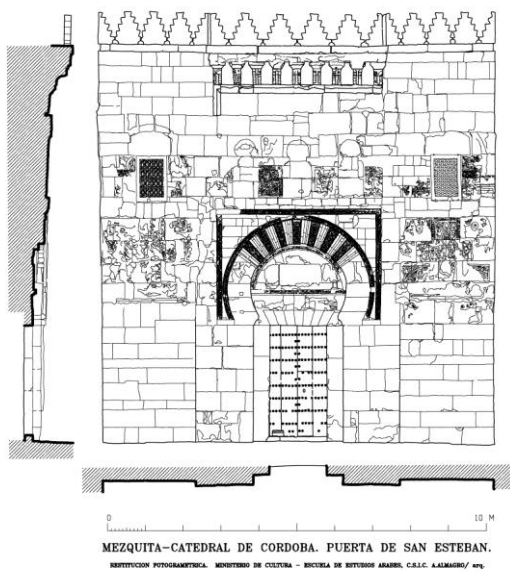


Fig. 4. *Bab al-Wuzara* (San Esteban's door) of the mosque of Córdoba

After almost fifteen years of work in collaboration with third parties, and much persuading on my side, in 1984 the Ministry of Culture finally decided to establish a Photogrammetry Cabinet that would become part of the *Instituto de Conservación y Restauración de Bienes*

Culturales, ICRBC (Institute for the Conservation and Restoration of Cultural Property), today the *Instituto del Patrimonio Cultural de España*, IPCE (Institute of the Cultural Heritage of Spain). Although in those years the first analytical stereo-plotters became available, given the financial constraints and my previous experience with the instrument, I decided to acquire a Zeiss Jena UMK10 metric camera and a Zeiss Jena Topocart D analog plotter with which I started a new journey, since I no longer depended on third parties. Being able to constitute my own team of operators, I decided to train experienced draftsmen of the Monuments Service itself who had the advantage of knowing how to draw and interpret photographs and represent historical architecture, thus allowing to obtain good drawings directly from the plotter.

With this equipment and the subsequent acquisition of other cameras, we began a process of experimentation and consolidation in the use of the photogrammetric technique performing “impact” surveys, while attending to the requirements of more urgent issues. One of the first works done with the newly acquired metric camera was that of the *Giralda* in Seville, which plotting was mostly undertaken by the Polytechnic University Service while the new stereo-plotter was received and installed. Later works, such as the *San Esteban's gate* (Fig. 4) and the Renaissance transept of Córdoba's cathedral-mosque, the *Salón de Comares* and the *Palacio de Carlos V* of the Alhambra, the cathedral of Astorga, the churches of Monserrat and *San Francisco El Grande* of Madrid, etc, soon highlighted our ability to master the technique and instruments as well as the great possibilities and advantages that photogrammetry could provide. In the *Salón de Comares* all the walls' stucco carved works were photographed to allow to plot them to a 1/1 scale. All these photographs were the embryo of the vast metric documentary archive held by the IPCE. At that time, guided by Maurice Carbonnell, I joined CIPA (*Comité Internacional de Photogrammetrie Architecturale*, today the International Committee for Documentation of Cultural Heritage, scientific committee of ICOMOS) where in subsequent years I was able to expand my knowledge and enrich myself with the experiences and teachings of multiple colleagues from other countries.

3. THE ANALYTICAL STEREPHOTOGRAMMETRY

Analog systems based on mechanically operated plotting instruments had enormous limitations in the sense of not allowing any correction of image deformations with respect to the theoretical perspectives. Therefore, it was compulsory to use metric photographs and, consequently, heavy and cumbersome cameras. The photos should always

be taken in a "normal" disposition (axes of the cameras parallel and perpendicular to the base) with the image plane almost parallel to the projection plane of the plotting with less than 5° deviation, etc. The use of complex mechanical calculators would allow the shots with vertical inclination of fixed angles, but at the expense of losing precision and complex orientation operations of the stereoscopic pairs.

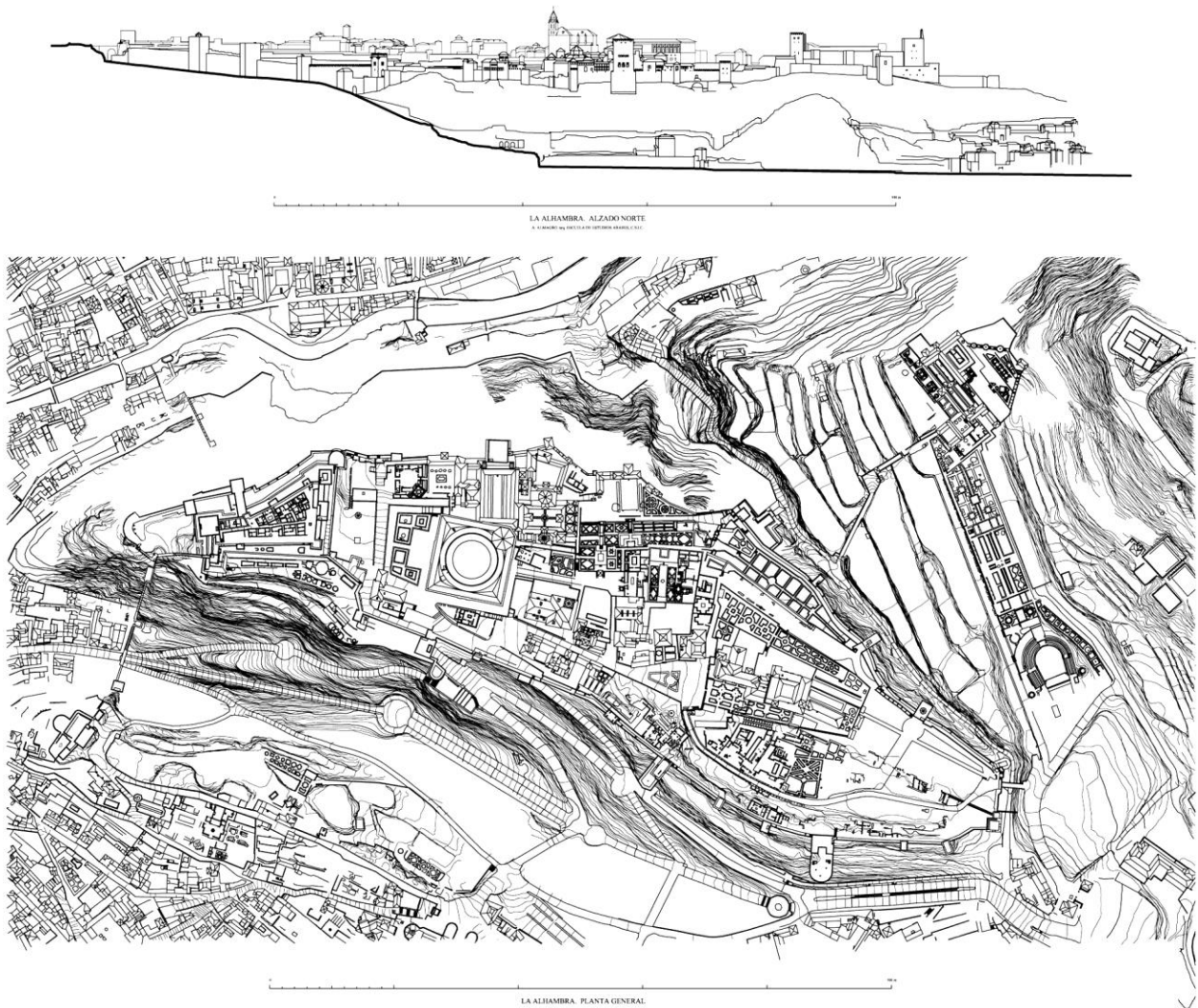


Fig. 5. Topographic plan and photogrammetric elevation of the historical complex of the *Alhambra*.

At that time, personal computers came onto the market allowing, due to their calculation speed, the development of analytical photogrammetry. Stereo-plotters ceased to be complex mechanical instruments that physically reproduced the projective rays using bars. Instead, they became simple instruments for measuring flat coordinates of homologous points in the photographs that the

computer would transform by means of mathematical calculation into three-dimensional coordinates of the object. The orientation of the photos was also done shortly by calculation, reducing errors and enabling any orientation of the photographs. The photographic shooting ceased to have restrictions on the rotation of the

cameras with respect to the drawing's projection plane.

Shortly after constituting the Photogrammetry Cabinet, the Ministry acquired a Wild Aviolyt BC2 analytical stereo-plotter. Initially, although the system would save a digital file of the drawing, this could only be visualized on paper by means of a plotter. With the new instrument, we were able to expand our activity, both quantitatively and qualitatively. One of the first works we carried out with it was a cartography of the Alhambra for setting up the first Special Plan of the monumental site. Similarly, to what it was done fourteen years before in Albarracín, not only the topographic plan was drawn but also the elevations and sections of the site and even some axonometric views (Fig. 5).

Shortly after, my professional activity experienced a substantial change when in 1987 I became involved in research activities in Islamic architecture at the *Escuela de Estudios Árabes de Granada*, belonging to the *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*, CSIC (Spanish Council for Scientific Research). Given the experience of previous years, and my conviction about the need to continue using photogrammetry as an architectural documentation system essential to develop an effective investigation and to address any restoration, I was forced to rethink the surveying methodology. In my new workplace there was no equipment and the economic possibilities were manifestly lower to those I had enjoyed at the Ministry of Culture. However, technology had undergone enough changes to allow for a new philosophical approach. Not only did I need less costly instruments, but these had to be lighter and easier to handle. From that moment on, my obsession was to be able to use photogrammetry in any place and circumstance without having to resort to a "safari" of heavy equipment porters that forced a complicated logistics, as it happened up until then. Fortunately, technological evolution allowed us to move along that path (Almagro 1993, 1999, 2002). Initially, I acquired an electronic theodolite and developed a computer program for topographic calculations specially adapted to architectural surveys, combining these measurements with rudimentary photographic rectifications obtained with a darkroom photo enlarger.

For the first works in my new destination, I could still count on the Ministry's instruments for the

two projects that I coordinated for the *Junta de Andalucía*. One was a photogrammetric documentation program within the Andalusian Cathedrals Plan consisting in a systematic taking of terrestrial and aerial photographs of the Andalusian cathedrals that was carried out with the cameras of the ICRBC Photogrammetry Cabinet, obtaining hundreds of metric photographs.

The contacts I made with the Air Force while working in Jordan, allowed me to involve the Cartographic and Photographic squad in the realization of low-level flights in order to obtain photographs at 1/1000 scale with which it was possible to reach plotting scales of up to 1/200 and, even with the support of field checks and measurements, reach 1/100 scales. By this mean, you could obtain plans and profiles of the cathedrals' rooftops completely in line with the plotting of the photos taken from the ground. These photographs were later plotted in several phases by different teams as required for the drafting of master plans or restoration projects (Almagro and Salmerón 1993). The other project developed entirely by me was the plotting of a topographic map at 1/100 scale of the archaeological site of *Madinat al-Zahra* which I later complemented with a thorough field review and the survey of the ruins using terrestrial photogrammetry (Fig 6) (Almagro 1992).

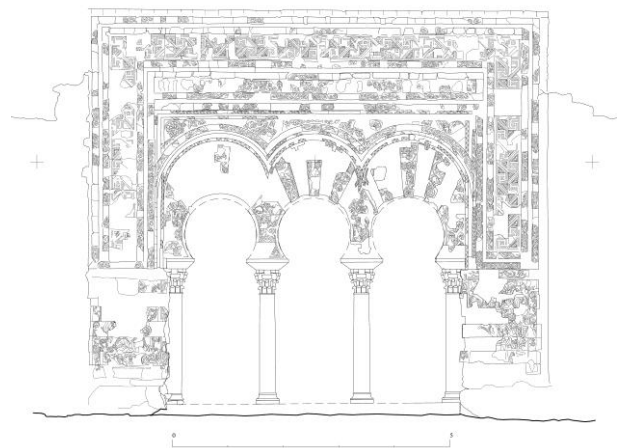


Fig. 6. Elevation of the façade of the so-called house of Yafar in *Madinat al-Zahra*.

After purchasing the electronic theodolite, the next acquisition, financed through a research project, was that of a small format Adam MPS2 analytical stereo-plotter (6 x 6 cm frames). The software incorporated in the analytical

photogrammetry systems would allow to correct systematic deformations of the images, thus enabling to incorporate the use of the so-called semi-metric cameras. These were standard cameras, usually 6 x 6 cm format, which with simple modifications (insertion of a *reseau* plate engraved with a grid and a focus locking system) and a calibration process (determination of the principal distance, of the principal point referred to the *reseau* and the polynomial coefficients to correct optical lens distortion) allowed to obtain similar performance to that of metric cameras. At the beginning, I acquired a Rollei 6006 metric, although later on I was able to transform and calibrate other cameras, especially using the Hasselblad SWC of 38 mm focal length and 6 x 6 cm format, thanks to the collaboration with CIPA colleagues.

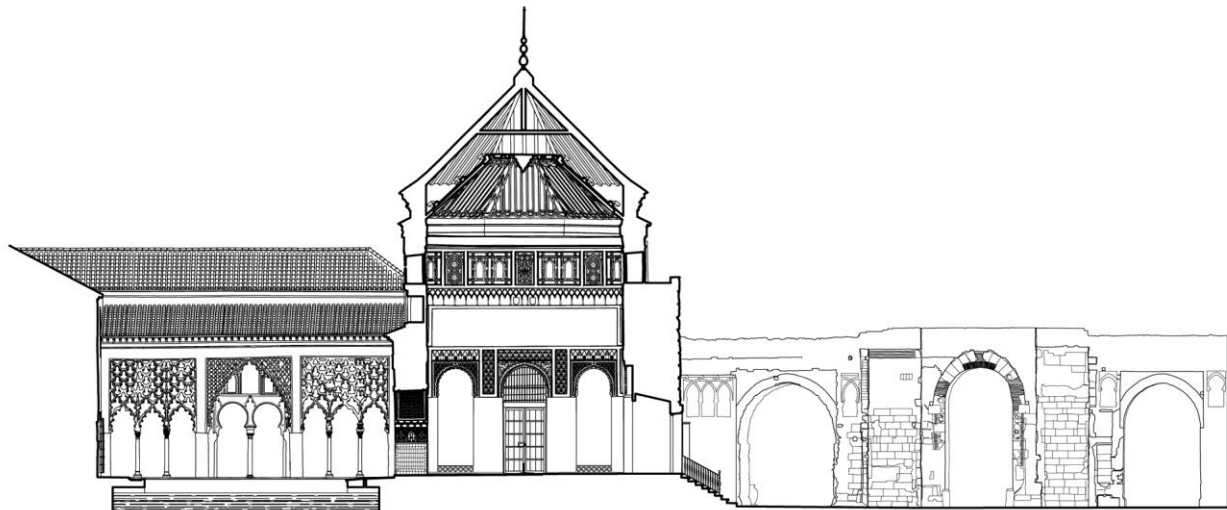
At the end of the eighties, the first CAD programs came out and although initially I had to develop specific software to transform the drawing files generated by the stereo-plotter into .dxf files, the interconnection between both systems was soon a reality. Consequently, plotting instruments became 3D digitizers of a three-dimensional virtual model connected to the CAD, which would register it and represent it on the monitor or by means of a plotter. In this way, the final

projections of the representations could be freely chosen using the CAD system. Similarly, I developed software for the Aviolyt BC2 stereo-plotter of the Ministry, in order to convert some of the works I made there into AutoCAD drawings starting, from that moment on, to make all my drawings in digital format.

A few years later, the CSIC provided me with funding to acquire a large-format analytical stereo-plotter, a Leica SD2000 with similar performances to that of the ICRBC. With it I would once again have the appropriate instruments to perform any type of survey, although with more versatile and lightweight cameras that allowed data to be taken faster and from places not reachable with heavy metric equipment. This enabled us to undertake large planimetric documentation projects, such as those of Seville's *Alcázar* (Fig. 7 and 8) and cathedral (Fig. 9 and 10) and the *Salvador de Sevilla* collegiate church (Fig. 11) that gave rise to the extensive collection of 120 drawings presented in three large-format publications (Almagro 2000a, 2007, 2008), to which was later added that of the *Cartuja de Granada* (Fig. 12) (Almagro 2010).

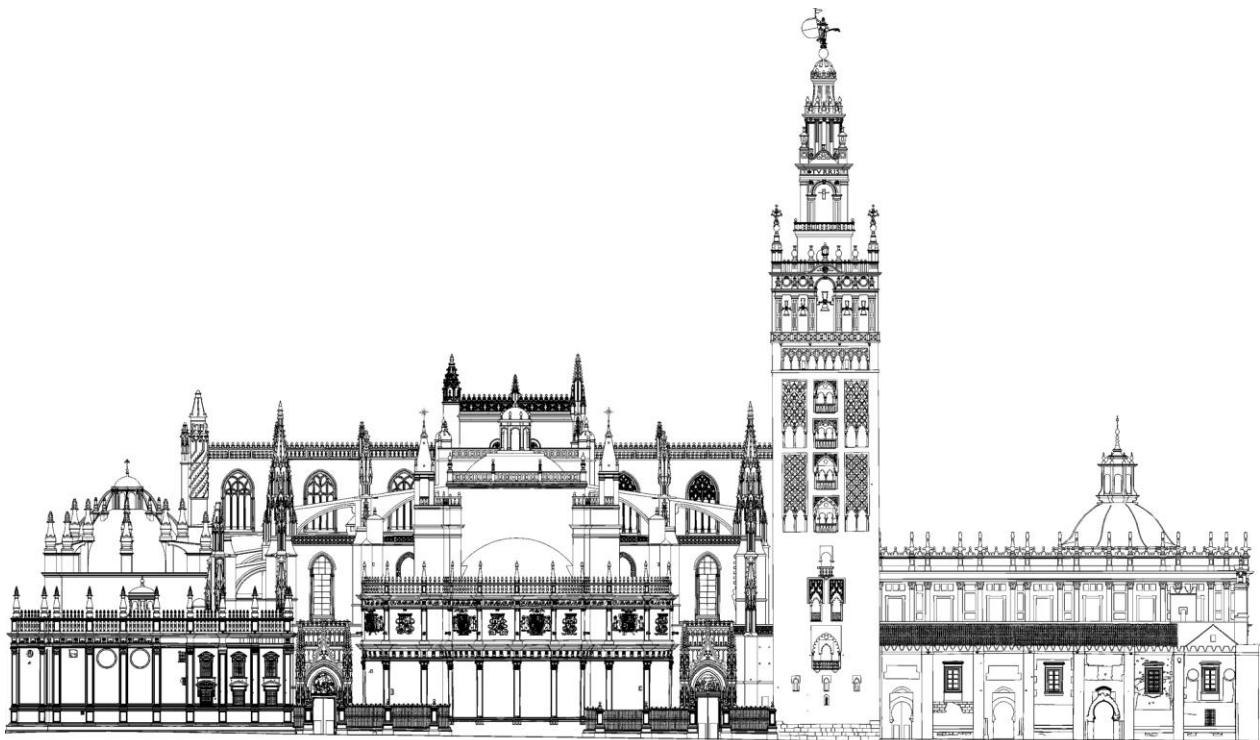


Fig. 7. Section of the *Palacio de Pedro I* in the *Alcázar* of Seville.



ALCAZAR DE SEVILLA. PATIO DEL YESO Y SALA DE LA JUSTICIA. SECCIÓN HACIA EL SUR.
ESCUELA DE ESTUDIOS ÁRABES, C.S.I.C. A.ALMAGRO/arg. L.ZUNIGA/arg.tec.

Fig. 8. Section of the *Patio del Yeso* and the Justice Hall of the *Alcázar* of Seville.



CATEDRAL METROPOLITANA DE SEVILLA. ALZADO ESTE.
ESCUELA DE ESTUDIOS ÁRABES, C.S.I.C. A.ALMAGRO/arg. L.ZUNIGA/arg.tec.

Fig. 9. Eastern elevation of the cathedral of Seville.

At the same time, the daily research work was generating a very large number of plans and drawings, always in digital format, which along with the photographs it constitutes nowadays a database, especially of al-Andalus architecture, of great relevance and that I have begun to be

made available to other users through the Digital.CSIC repository (Fig. 13-15).

The calculation possibilities offered by computers allowed the development of analytical photogrammetry outside the mere restitution by stereoscopic vision.

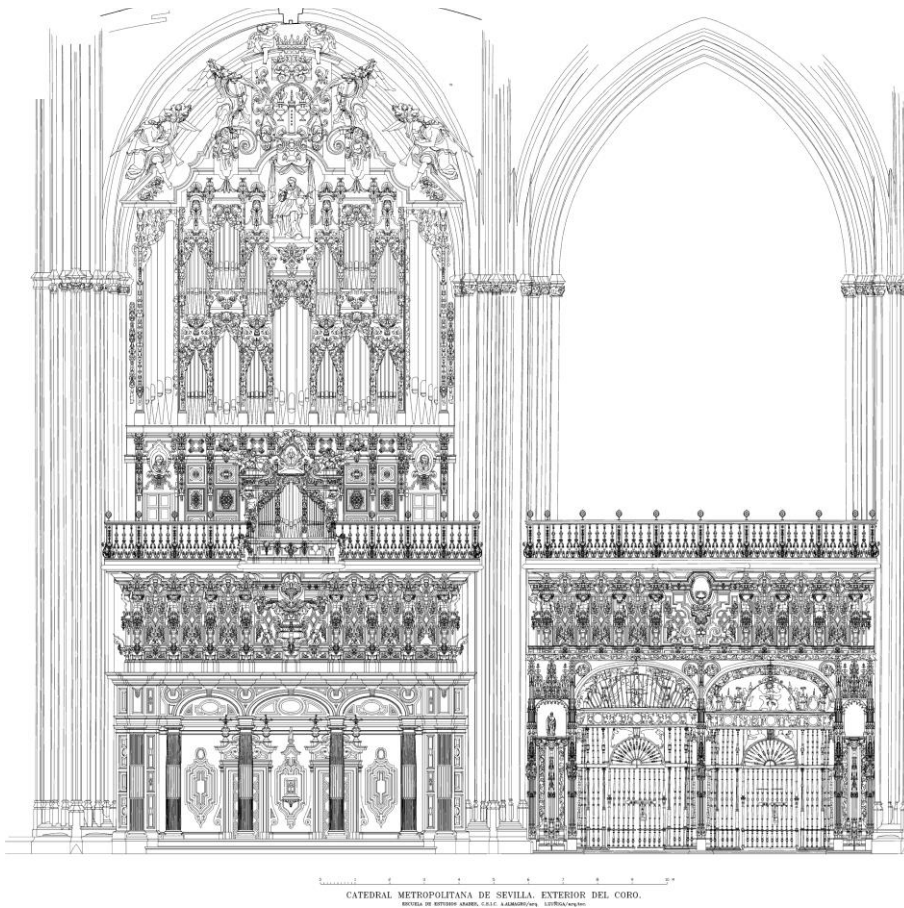


Fig. 10. Exterior elevation of the choir and organ of the cathedral of Seville.



Fig. 11. Cross section of the collegiate church of *El Salvador* in Seville.



Fig. 12. Section for the sacristy, church and chapter rooms of the *Cartuja de Granada*.

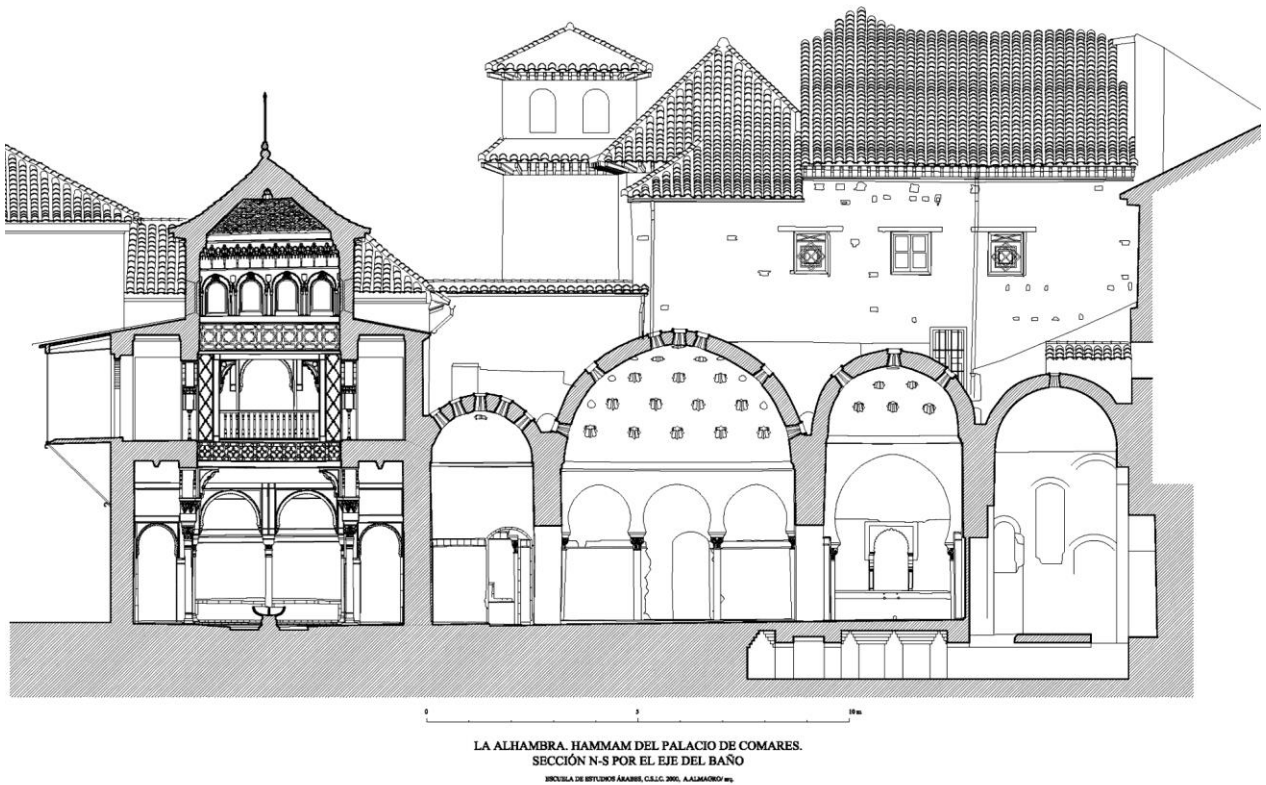


Fig. 13. Section of the *Baño Real del Palacio de Comares* at the *Palacio de la Alhambra*.

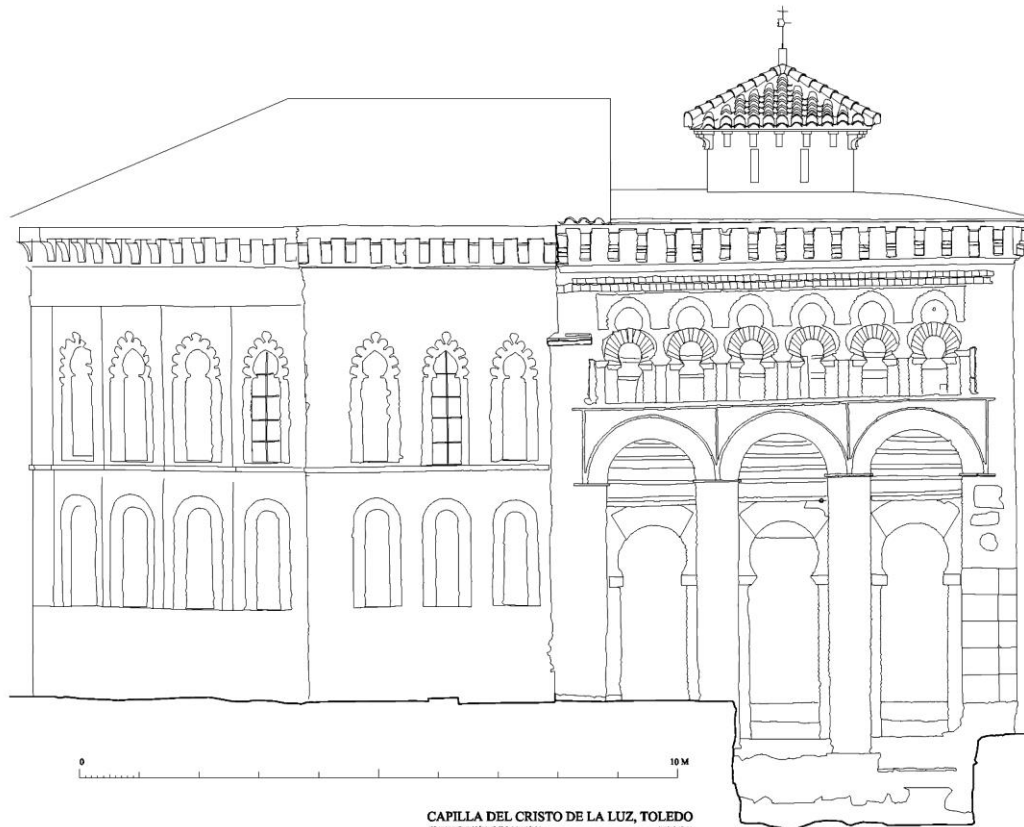


Fig. 14. Northern elevation of the church of *El Cristo de la Luz* of Toledo (mosque of *Bib al-Mardun*).

The first aerotriangulation systems for the adjustment and orientation of bands of aerial frames, that permitted to calculate the coordinates of control points for the orientation of multiple pairs of photos from a few control points, followed with more complex software of block bundle adjustment of convergent axes photographs. Through CIPA I had knowledge of these systems and was able to acquire and use two of those programs. One was ORIENT, developed at the Technical University of Vienna (TUW) by Dr. Kager. With it, I carried out different experiences of obtaining control points from series of photographs for the subsequent orientation of stereoscopic pairs and I performed semi-metric camera calibrations. Having available a large number of photographs displaying the same points of the object, allows for a greater number of data than those necessary for the calculation and adjustment of the orientation of the images. This redundancy makes it possible that what in the systems of equations are data, they can become unknowns to be calculated looking for better results in processes based on least squares. In this way, on the bases of approximate values, it is possible to determine

the calibration parameters' (principal distance, principal point position and distortion coefficients) precise value. Following this procedure, I calibrated several semi-metric converted cameras, as above mentioned. To acquire the necessary data, we would use the ADAM restorer as a mono-comparator to measure the image coordinates that were then introduced into the calculation process, which was a bit burdensome. Subsequently we purchased the MAAS-CR program adapted to the Leica stereo-plotter, which made the process much more fluid and interactive by being able to simultaneously introduce many 6 x 6 cm format photographs into photo frame holders prepared for 23 x 23 cm aerial photos. With these procedures, we were able to perform, among other works, the simultaneous orientation of 48 stereoscopic pairs of the vaults of the cathedral of Seville from only 28 control points measured with a total station and obtaining 150 pass-point coordinates (Fig. 16) (Almagro 1997).



Fig. 15. Elevation of the *Mihrab* of the mosque of Córdoba (ortho-image and drawing overlaid).



Fig. 16. Isometric vaults of the cathedral of Seville.

4. A NEW ERA: DIGITAL PHOTOGRAMMETRY

Coinciding with the end of the 20th century, the use of digital photographs from two different sources was also extended in photogrammetry. On the one hand, those generated from traditional photographs digitized by scanner and, on the other, those produced by cameras equipped with CCD sensors and later on with CMOS. Soon, these types of commercial cameras were available at increasingly affordable prices. Digital images present great advantages for photogrammetric use. In the first place, we can say that they have incorporated the metric of all their points. In consequence, by pointing to a pixel we are able to know its image coordinates defined by the row and the column that it occupies in the matrix, which can be referred to the center of the image or to any of the apex. In addition, being a numerical matrix, they are not altered or suffer deformations with time or by external actions. This makes it unnecessary to have costly systems to accurately measure images, which has resulted in a remarkable price reduction of photogrammetric systems.

It is true that the image quality metrics depends on how it was generated. A regular scanner does not guarantee the conservation of the geometry of the metric or semi-metric photograph it scans, so if we want to make use of metric images, we shall scan those using quite costly precision instruments. However, this is a procedure put in place in order to continue using photographs from photogrammetric archives created in the past. But in digital cameras, it is considered that the sensor is an element not suffering from dimensional alterations, so the image produced in it remains unchanged. Therefore, any digital camera can be assimilated to a semi-metric camera as long as we keep the optics fixed and calibrated.

These principles and properties enabled a true revolution in photogrammetry from the beginning of this century by making it possible to dispense with expensive instruments for photographic capture and measurement. Everything has been reduced to the use of cameras that can be purchased in any store and which resolution has been constantly increasing with hardly any price alteration and with increasingly sophisticated and powerful software that only requires of medium performance computers: almost any computer of those used for games is valid for these purposes.

It can be said that what I looked for since my first experiences, today is perfectly achievable: to have totally portable systems allowing carrying out a graphic survey in any place and usable almost under any circumstance.

Although digital photogrammetry systems were soon available on the market, in the early days their price was also high. However, I had access through CIPA to systems developed in universities and research centers that I had the opportunity to use, at first in order to evaluate them and then as a collaborator, both making suggestions as a user and translating their instructions and user interface messages for use in Spanish. First it was the VSD developed by Prof. Jachimski of the AGH University in Warsaw (Almagro 2000b) and then the Poivilliers F of the engineer Ives Egels of the IGN of France. The first shows the stereoscopic pair on the screen, an image in each half of it, which must be observed using a mirror stereoscope. The system superimposes a pointer on each image that is seen as a floating mark that moves in the virtual space and is used for drawing. For large desktop monitors, we used a mirror stereoscope, intended for aerial photo-interpretation, held in a suitable support. For use in laptops, I built small ad hoc stereoscopes that allowed the system to be used anywhere the laptop could be taken. The problem with this system was that it was written for MS-DOS and, although it worked under Windows, the latest versions of this operating system no longer support old system applications. Although it can still be used with a simulator, it is extremely burdensome. Poivilliers F is more modern and is written for Windows. This system superimposes both images on the monitor, either filtered to be observed with anaglyph glasses or alternated for viewing on a monitor with stereoscopic vision properties and wearing occlusion glasses. In this case, in addition to the monitor and glasses, an NVidia Quadro type graphics card is required. In both systems, the 3D plotted drawing is superimposed on the stereoscopic model and can be subsequently exported to AutoCAD. Additionally, I also participated in the improvement and dissemination of the ASRix program, developed by Steve Nickerson to make photographic rectifications, which I have assiduously used as well.

Progressively and inasmuch as digital cameras were gaining higher resolution, we started to use

digital systems more frequently, so that since 2018 the analytical stereoplotters of the *Escuela de Estudios Árabes* are no longer in use. During these years we have completed countless works by these means, using scanned metric and semi-metric photographs as well as digital photos. Thus, much of the surveying of the collegiate church of *El Salvador* of Seville was carried out with VSD while others, such as the elevations of Córdoba's mosque (Fig. 17 and 18), were done with Poivilliers F.

Digital photography also caused innovations in the bundle adjustment systems immediately since, as the photo measurement is integrated into the computer program, the entire process becomes interactive, facilitating the re-observation and errors correction. On the other hand, progress made as far as the calculation systems and the computing power, has allowed the application of procedures such as the correlation for homologous point detection and processes automation.

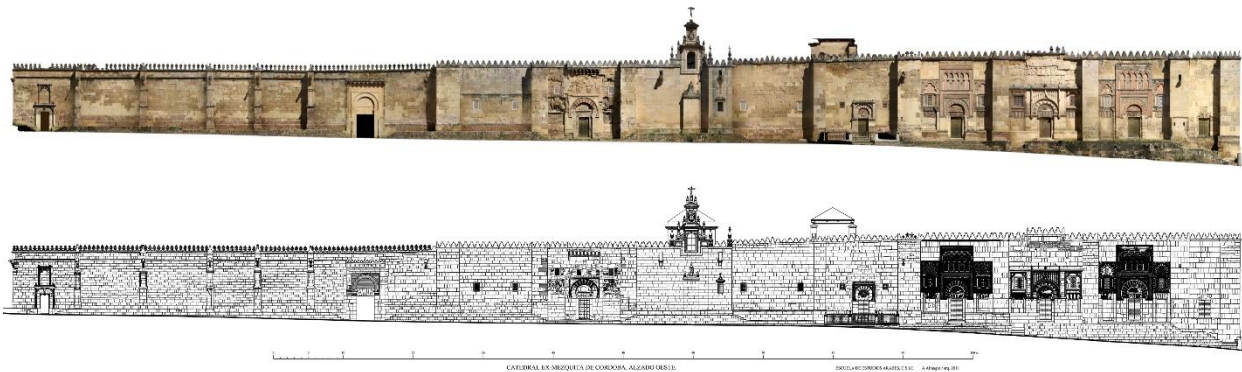


Fig. 17. Ortho-image and vector drawing of the western elevation of the cathedral, old mosque, of Córdoba.

For our experience, we initially used the Orthoware software developed by the company Metria, advised by the *Universidad Politécnica de Valencia*. This software allows for block orientation of digital photographs to automatically generate point clouds using automatic correlation. From these, meshes of surfaces are generated, which can be texturized and from which ortho-images are obtained by projecting the 3D model thus formed. Initially, our interest in this software focused on the possibility of using it like the old beam adjustment software to calibrate the digital cameras that we were still using in stereoscopic plotting, and to obtain control points throughout the building or object to be plotted, starting with some few control points measured by topographic procedures, or even with mere linear measurements and on-site observations. That is, improving and wide spreading simplified photogrammetric surveying methods, which has remained one of our main objectives during all these years.

The emergence of the company Agisoft's Photoscan software, recently renamed Metashape, came to introduce remarkable

improvements in the procedure by almost completely automating the entire process, since the initial detection of homologous points and photographs orientation is calculated without the operator's intervention.

These programs, often called photogrammetric scanning applications, allow three-dimensional models to be generated from point clouds, similar to what is achieved with laser scanners. I must emphasize that so far, I have not mentioned these measurement procedures, this being due to the fact that the use I have made of them has been very scarce and that I have never had an instrument of this kind. When I have carried out some work or test, it has been in collaboration with other colleagues. The fundamental reason for having renounced to use it is that until now laser scanners failed to comply with the premises I had set for my graphic survey work: simple procedures with low-cost instruments, easy to carry anywhere and in any situation. Until quite recently, laser scanners were considered heavy equipment, requiring several people to transport them; they posed parking and handling difficulties, for example, on scaffolding or from

places with difficult access, and have been very costly equipment. Additionally, their transportation to certain countries may have faced customs complications, etc. Instead, a compact digital camera and a Disto-type laser distance meter can be carried in a pocket or attached to the belt and even allow you to make a survey discreetly, being able to pass unnoticed, as if it were a simple tourist. This is not a trivial matter in certain countries and circumstances where getting a permit to perform the measurements is sometimes burdensome or even impossible and, in general, requires a significant waste of time in bureaucratic efforts.

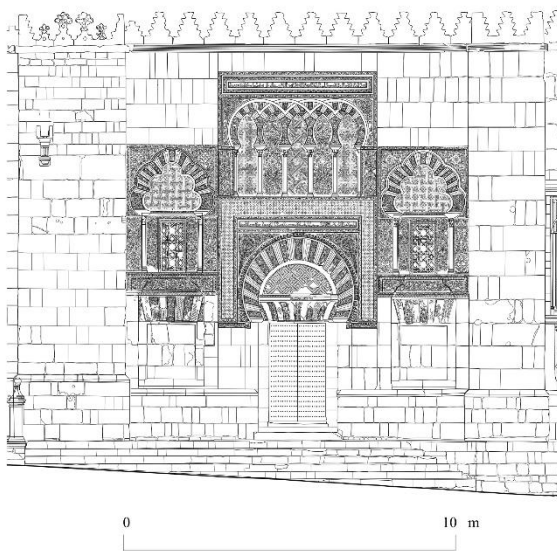


Fig. 18. Detail of the previous figure.

Today's available systems allow many works to be done using very simple means. For years I have been using a Ricoh GR compact camera with fixed wide-angle lens equivalent to 28-mm with a 16 M

pixels resolution. I accompany it with a Leica Disto X4 distance meter, with digital display to be able to aim it at a target in bright environments where the laser beam cannot be seen. This distance meter incorporates an inclinometer allowing it to be used as a level (with 0.1° precision), that placed over a photographic tripod provides additional field data, not too precise, but sufficient in most cases of research work and even of restoration. Everything can be transported as hand luggage and its use is discreet. With the data obtained in the field and the software, whether of stereoscopic plotting or photogrammetric scanning, it is possible to perform graphic surveys of almost any size. What fifty years ago required sophisticated and expensive instruments of very complex management, today it is achieved with domestic means affordable to professionals and, sure enough, to any academic department or administrative center.

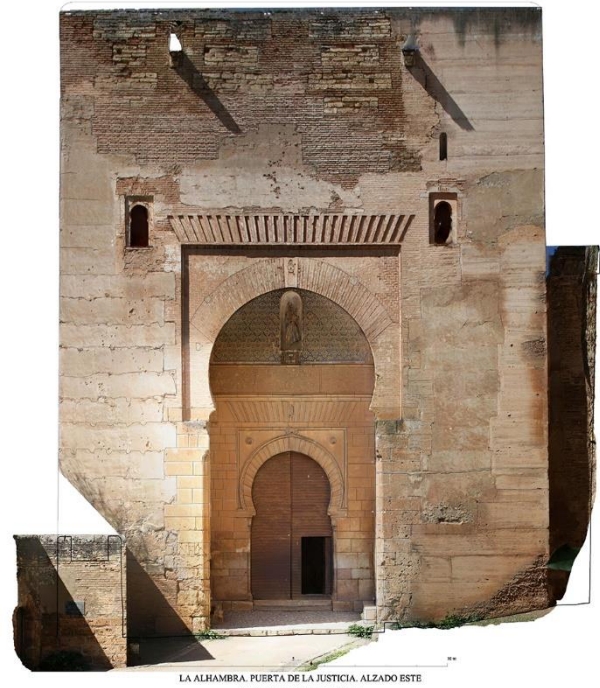


Fig. 19. Elevation of the *Puerta de la Justicia* of the *Alhambra* (overlying ortho-image and drawing).

In any case, it must be remembered that the 3D models generated by these procedures or by means of a laser scanner, and even the ortho-images, are raw material that requires interpretive processes and graphic elaboration (Almagro and Almagro 2007). The value of the drawing as a means of expression has not lost its validity nor can it be radically substituted by

computer-generated imagery. The drawing developed in accordance with the norms of descriptive geometry requires a prior analysis of reality, its understanding and interpretation and its synthetic expression through lines, fundamentally. Although it is true that an ortho-image contains much more information than the drawing, it can however be more confusing and less expressive.

What I most frequently use is a combination of the orthographic image with photographic texture and vector drawing, either superimposed (Fig. 15 and 19) or displayed in parallel (Fig. 17 and 18). This allows the drawing to express the synthesized analysis while the image provides the details of color, texture and second or third level elements whose vector representation requires an enormous work effort without contributing a proportional added value to the drawing. Typically, in paper presentations I print both drawings separately, and in digital documents (dwg or pdf) I use different overlapping layers that can be activated or deactivated at will. In any case, the vector line superimposed on the image always brings clarity and precision to the graphic document.

Among the recent innovations available for the accomplishment of architectural surveys, is the

use of drones for aerial photographic shots. This allows us to dispense with the use of metric aerial photographs, also achieving larger scales in surveys and being able to photograph previously unattainable areas. Among the recent works I have completed using a drone I can mention the survey of the Volúbilis archaeological site in Morocco. For this project, I managed to generate a 3D model, and with it an ortho-image with a 3 cm /pixel resolution for an area of more than 50 Ha from 3,100 photographs. The final image has 30,000 x 30,000 pixels (Fig 20).



Figure 20. Ortho-image in zenith view of the *Casa del Cortejo de Venus* of Volúbilis.



Fig. 21. Longitudinal section of the al-*Qarawiyyin* mosque in Fez).

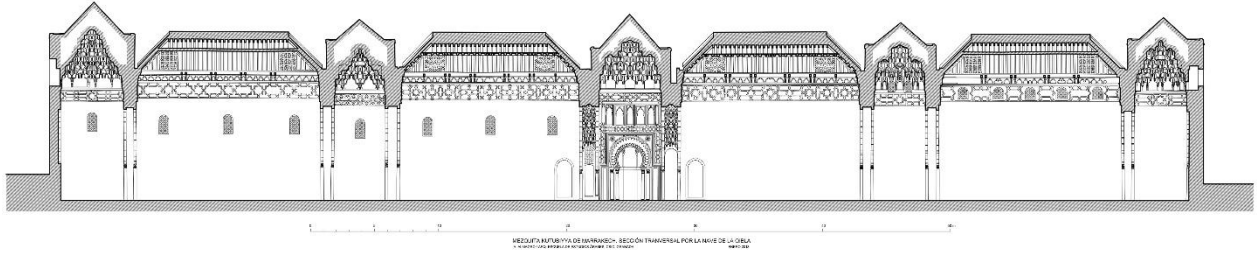


Fig. 22. Section of the *qibla* nave of the *Kutubiyya* mosque in Marrakech.

My activity in recent years is mainly focused in North African countries, especially Morocco (Almagro 2013). Apart from activities developed in the frame of specific research projects, I have tried to fill the existing documentary gap since, from the time of the Protectorate, very little progress has been made in documenting its rich heritage and to make the available documentation accessible to the scientific community. Thus, I have documented almost all the important monuments that I have had the opportunity to visit taking stereoscopic pair images or more extensive shots of photograph blocks to generate 3D models. Especially relevant have been the works done in the great historical mosques of Morocco, the *Qarawiyyin* of Fez (Fig. 21) and the

Kutubiyya of Marrakech (Fig. 22), as well as the Almoravid mosque of Tlemcen in Algeria.

Regardless of the fact that many of these drawings have been published in articles and scientific monographs, I am proceeding to place all this graphic material generated throughout my professional activity in the CSIC repository (<https://digital.csic.es/handle/10261/176807>), in order to make it available to other researchers or those responsible for heritage conservation. Undoubtedly, this work should have continuity by improving our information and knowledge systems as the best way to guarantee the conservation of our heritage.

REFERENCES

- Almagro, Antonio, 1973, "Documentación Fotogramétrica en ruinas y monumentos", *Bellas Artes* 73, nº 127. Madrid. p. 45-46. <http://hdl.handle.net/10261/20479>.
- Almagro, Antonio, 1978, "Estudio fotogramétrico del Teatro Romano de Sagunto", *Saguntum* 14. Valencia. p.165-179. <http://hdl.handle.net/10261/20461>
- Almagro, A., 1987, *Plano Guía de la Ciudad de Albarracín*. Madrid. <http://hdl.handle.net/10261/21519>
- Almagro, Antonio, 1988, "Le Rélevé Photogrammétrique de la Citadelle d'Amman", *Relevés Photogrammétriques d'Architecture Islamique*. (Actas del Symposium Internacional sobre fotogrametría aplicada a la arquitectura islámica, Túnez 1984), Túnez. p. 177-198. <http://hdl.handle.net/10261/22138>.
- Almagro, Antonio, 1992, "Photogrammetrie numerique pour la Documentation du site archéologique de Madinat al-Zahra", *CIPA XIII International Symposium, Cracow 1990*, Cracovia. p. 11-20. <http://hdl.handle.net/10261/31837>.
- Almagro, Antonio, 1993, "Simple methods in architectural photogrammetry", *XIV International Symposium of Architectural Photogrammetry, Delphi 1991*, Atenas. p. 209-225. <http://hdl.handle.net/10261/21396>.
- Almagro, Antonio, 1994, "Levantamiento planimétrico del Templo de Debod", *Estudios de Prehistoria y Arqueología Madrileñas*, 9, p.111-116. <http://hdl.handle.net/10261/20490>.
- Almagro, Antonio, 1997, "Bundle adjustment in the daily work of recording cultural heritage",

- International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. XXXI, 5C1B, CIPA International Symposium 1997, Goteborg. p. 186-190. <http://hdl.handle.net/10261/22124>.
- Almagro, Antonio, 1999, "Photogrammetry for everybody", XVII *CIPA International Symposium on Architectural Photogrammetry*, Recife (Brasil). <http://hdl.handle.net/10261/19824>.
- Almagro, Antonio, 2000a, *Planimetría del Alcázar de Sevilla*, Granada. <http://hdl.handle.net/10261/20325>.
- Almagro, Antonio, 2000b, "VSD in Spain. Cooperation between Poland and Spain in Terrestrial Photogrammetry. *Fotogrametria, Teledetekcja i GIS u Progu Trzeciego Tysiaclecia, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 10, Krakow, p. 6.1-6.9. <http://hdl.handle.net/10261/19820>
- Almagro, Antonio, 2002, "Simple Photogrammetry. Easy and Fast", XVIII *International Symposium of CIPA, Potsdam, September 18-21, 2001*. Berlín, p. 32-38. <http://hdl.handle.net/10261/19819>.
- Almagro, Antonio y Almagro-Vidal, Ana, 2007, "Traditional drawings versus new representation techniques", *Proceedings of the 21st CIPA International Symposium: Anticipating the Future of the Cultural Past*, Athens, p. 52-57. <http://hdl.handle.net/10261/19818>.
- Almagro, Antonio, ZÚÑIGA, J.I. 2007, *Atlas arquitectónico de la Catedral de Sevilla*, Sevilla-Granada. <http://hdl.handle.net/10261/20324>.
- Almagro, Antonio, 2008, *Planimetría de la Iglesia Colegial del Divino Salvador de Sevilla*, Sevilla. <http://hdl.handle.net/10261/20307>.
- Almagro, Antonio, 2010, *Planimetría de la Cartuja de la Asunción de Nuestra Señora de Granada*, Granada. <http://hdl.handle.net/10261/29526>.
- Almagro, Antonio, 2013, "Surveying World Heritage Islamic Monuments in North Africa", *ISPRS Annals Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-5/W1, p. 13-18. <http://hdl.handle.net/10261/81939>. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W1-13-2013>.
- Carbonnell, Maurice, 1989, *Photogrammétrie appliquée aux relevées des monuments et des centres historiques*, Rome : ICCRO.
- Salmerón, Pedro, y Almagro, Antonio, 1993, "La Catedral de Granada. Documentación y levantamientos fotogramétricos", *La Conservación del Patrimonio Catedralicio: Coloquio Internacional Madrid, 21/24 de noviembre de 1990*, Madrid: Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, p. 99-112. <http://hdl.handle.net/10261/21338>.

How to cite this article / Citation

Almagro Gorbea, A. 2019. "Half a century documenting the Architectural Heritage with photogrammetry", *EGE Revista de Expresión Gráfica en la Edificación*, N° 11, Valencia: Universitat Politècnica de València. pp. 4-30. <https://doi.org/10.4995/ege.2019.12863>.

1. INTRODUCCIÓN

La conservación del patrimonio debe estar siempre basada en su conocimiento. El levantamiento planimétrico es sin duda el más eficaz y valioso instrumento de conocimiento y análisis del patrimonio arquitectónico que hasta ahora poseemos. La representación de la arquitectura mediante los métodos establecidos por la geometría descriptiva nos proporciona una información de la forma y las dimensiones de un objeto arquitectónico a las que luego podremos añadir técnicas gráficas que nos ilustren acerca de las texturas y colores. Aunque las nuevas tecnologías de representación tridimensional pueden enriquecer ese conocimiento, las plantas y secciones siguen siendo medios insustituibles para conocer y analizar de manera sintética la realidad formal y espacial de un edificio.

A esta convicción he llegado a través de un proceso que en buena medida se puede decir que estuvo condicionado por experiencias negativas, es decir, de ver cómo la ausencia de buena documentación planimétrica me impedía o dificultaba lograr un adecuado conocimiento de un edificio y con ello, traía consigo dificultades añadidas en labores de estudio y conservación. Una de mis primeras experiencias, que sin duda dejaron huella en mi actividad posterior, fue con motivo del remontaje del Templo de Debod en Madrid (Almagro 1994). La escasa y a veces contradictoria información planimétrica suministrada junto con los bloques desmontados del templo dificultó bastante la reconstrucción que hubo de auxiliarse de levantamientos publicados en viejos trabajos y que me llevaron a abordar una planimetría completa del templo una vez remontado, donde pude comprobar las dificultades que conlleva este tipo de trabajo realizado con sólo medios manuales, es decir, con cinta métrica y a lo sumo una plomada o un nivel de agua. Estas mismas dificultades puede encontrar en los levantamientos de mis primeras obras de restauración, donde no sin errores conseguía dibujar las plantas, pero en los alzados y secciones la medición de alturas y de elementos inalcanzables resultaba en general dificultosa y a veces imposible.

2. LOS TIEMPOS DE LA FOTOGRAMETRÍA ESTEREOSCÓPICA ANALÓGICA

Con estas experiencias iniciales, tuve mi primer contacto con la fotogrametría. Un amigo de mi familia, geólogo, que descubría yacimientos arqueológicos a

través de las fotografías aéreas que él usaba en su trabajo, me habló por primera vez de cómo se hacían planos topográficos a partir de esas fotografías. En el año 1972 la Dirección General de Bellas Artes me encargó realizar un estudio del Conjunto Histórico de Albarracín, lo que se denominaba un “Plan Urgente de Protección” que pretendía ser una especie “plan especial” cuando esa figura aún no existía en la legislación urbanística. La importancia de la topografía del emplazamiento de este conjunto, que hacía que la protección de las visuales exteriores y la conservación de la volumetría resultara primordial en ese estudio, me movió a pensar en usar esa técnica para generar un buen plano topográfico con curvas de nivel e información altimétrica fiable. Con la ayuda de técnicos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) encargué unas fotos aéreas a la mayor escala que se podía obtener (1/3.500) y mediante un restituidor analógico Wild A8 me proporcionaron una planta a escala 1/500 de todo el conjunto, con curvas de nivel cada 0.50 m, y el dibujo de todos los tejados con cotas de altimetría de todos los elementos singulares (aleros, cumbres, etc). Creo que Albarracín fue el primer Conjunto Histórico en España que contó con una información de este género (Fig. 1). Debo reconocer que me gasté casi todo el presupuesto disponible en generar ese plano, por lo que el resto del estudio lo tuve que hacer a mi costa. A partir de esta experiencia y de modo casi simultáneo acometí la documentación de distintos yacimientos arqueológicos en los que tuve encargos de obras de consolidación como Numancia, Azaila, Clunia o Segóbriga encargando los oportunos vuelos fotogramétricos y las restituciones correspondientes.

Casi al mismo tiempo tuve ya un contacto pleno con la fotogrametría, sus principios y sus posibilidades: cómo las propiedades geométricas de la perspectiva inherentes a la imagen fotográfica nos permiten reconstruir los haces proyectivos; a partir de los haces de dos fotografías obtenidas desde sitios distintos es posible, mediante la intersección de sus haces, determinar la posición espacial de todos los puntos registrados en ambas imágenes; la estereoscopia ayuda a la fácil identificación de los puntos homólogos. Gracias al curso de especialización en restauración que cursé en 1973 en Roma, organizado por el ICCROM y la Facultad de Arquitectura de la Universidad de La Sapienza, tuve la oportunidad de conocer y recibir docencia de dos de los máximos impulsores de las aplicaciones de esta técnica en el patrimonio. Maurice Carbonell, ingeniero del *Institut Géographique National*

de Francia y Hans Foramitti, de la *Bundesdenkmalamt* (Oficina Federal de Monumentos) de Austria me introdujeron en la teoría y la práctica de esta técnica aplicada a la documentación arquitectónica. Allí aprendí, entre otras cosas, los rudimentos de las tomas fotográficas con cámaras métricas y la posibilidad que ofrecía el sistema de medición tridimensional y de obtención de proyecciones sobre distintos planos. Conocí especialmente los trabajos del IGN de Francia y sus alzados urbanos dibujados a partir de fotos aéreas y también los trabajos de documentación sistemática que realizaba el *Bundesdenkmalamt* (Carbannel 1989) que inmediatamente me hicieron pensar en su gran utilidad y en aplicarlos en Albarracín. En el verano de ese mismo año organicé una misión de tomas fotográficas con una bicámara métrica Zeiss Ikon SMK120, propiedad del ICCROM, con la que se obtuvieron más de cien fotografías estereoscópicas de Albarracín, las ruinas de Segóbriga y el castillo de Mora de Rubielos (Almagro 1973). Con la experiencia y el material fotográfico obtenido pudimos posteriormente realizar restituciones de los alzados generales del conjunto de Albarracín, así como de distintas construcciones del mismo conjunto (Almagro 1987) y del teatro y anfiteatro de Segóbriga, utilizados en trabajos de restauración.

A partir de ese momento, en todos los proyectos en que tuve ocasión de actuar acudí al uso de esta técnica recurriendo a la colaboración de organismos o empresas que dispusieran del equipamiento adecuado. Muy especial fue la colaboración con el Servicio de Fotogrametría y Fotointerpretación de la Universidad Politécnica de Madrid ubicado en la Escuela de Ingenieros Agrónomos, que disponía de un restituidor Zeiss Jena Topocart B con el que era posible obtener proyecciones del modelo fotogramétrico sobre los distintos planos de referencia del sistema de coordenadas, lo que permitía dibujar plantas, alzados y perfiles. Fruto de esta colaboración fueron los trabajos de levantamiento realizados el castillo de Mora de Rubielos, así como los del castillo y el teatro romano de Sagunto (Figg. 2 y 3) (Almagro 1978), que fueron después utilizados, muy a pesar mío, en la desastrosa intervención allí llevada a cabo, quedando estos dibujos como testimonio del estado anterior. Mención especial merece el proyecto de documentación de la Ciudadela de Amman (Jordania), para el que se contó con la colaboración del Ejército del Aire español que desplazó a Jordania un avión con dos cámaras para tomas fotogramétricas aéreas. Aprovechando el viaje se transportaron los equipos de fotogrametría terrestre y topografía realizando un levantamiento completo combinando fotos aéreas y terrestres (Almagro 1988). También se aprovechó para documentar numerosos yacimientos arqueológicos de ese país. En todos los casos aprovechábamos ya las posibilidades de obtener distintas proyecciones, pese a las fuertes limitaciones que comportaban los restituidores analógicos.

Una de las enseñanzas que saqué de estas experiencias fue que la fotogrametría era un instrumento efficacísimo para la medición, pero no resolvía por sí sola los problemas de representación y grafismo de los dibujos finales. Al tener que acudir a empresas y técnicos normalmente dedicados a los trabajos topográficos y habituados a hacer cartografía del terreno, pero no a representar obras de arquitectura histórica, comprobé que los dibujos que salían del restituidor resultaban muy deficientes. Así confirmé que, para dibujar arquitectura, es imprescindible conocer la naturaleza y características de aquello que se dibuja. La mera contemplación de una foto no permite a quien la observa dibujar correctamente lo que allí aparece si no tiene unas nociones suficientes de la materia. En aquellos momentos lo único que pude hacer fue redibujar las restituciones interpretando adecuadamente lo que se quería representar. Esta experiencia me serviría después en la selección de colaboradores cuando pude disponer de los instrumentos de restitución expresamente dedicados al levantamiento arquitectónico. Comprendí que era más fácil y se aprendía antes a manejar un restituidor de fotogrametría que a dibujar y representar adecuadamente la arquitectura.

Tras casi quince años de trabajos realizados con la colaboración de terceros y tras muchas insistencias, en 1984 el Ministerio de Cultura decidió finalmente constituir un Gabinete de Fotogrametría que pasaría a integrarse en el Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (ICRBC), hoy Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE). Aunque en esos años empezaron a aparecer los primeros restituidores analíticos, la limitación de presupuesto y la experiencia que tenía con el instrumento, me movió a adquirir una cámara métrica Zeiss Jena UMK10 y un restituidor analógico Zeiss Jena Topocart D con los que inicié una nueva andadura, pues ya no dependía de terceros. Pude constituir mi propio equipo de operadores para lo que decidí formar a dibujantes experimentados del propio Servicio de Monumentos que tenían la ventaja de saber dibujar e interpretar fotografías y representar la arquitectura histórica, pudiendo por tanto obtener buenos dibujos directamente desde el restituidor.

Con ese equipo y la posterior adquisición de otras cámaras, iniciamos un proceso de experimentación y afianzamiento en el uso de la técnica fotogramétrica realizando levantamientos “de impacto”, a la vez que atendíamos a requerimientos de temas urgentes del servicio. Un primer trabajo realizado con la recién adquirida cámara métrica fue el de la Giralda de Sevilla cuya restitución aún se realizó en gran parte en el Servicio de la Universidad Politécnica mientras se recibía e instalaba el nuevo restituidor. Trabajos posteriores como la puerta de San Esteban (Fig. 4) y el crucero renacentista de la Catedral-Mezquita de Córdoba, el Salón de Comares y el Palacio de Carlos V

de la Alhambra, la Catedral de Astorga, las iglesias de Monserrat y San Francisco el Grande de Madrid, etc. pusieron pronto de relieve nuestra capacidad de manejo de la técnica y el instrumental y las grandes posibilidades y ventajas que brindaba la fotogrametría. En el Salón de Comares se fotografiaron todos los paramentos de yesería para poder restituirlos a escala 1/1. Todas estas fotografías fueron el embrión del vasto archivo documental métrico que conserva el IPCE. En ese tiempo, de la mano de Maurice Carbonnell, entré a formar parte del CIPA (*Comité International de Photogrammetrie Architecturale*, hoy *International Committee for Documentation of Cultural Heritage*, comité científico del ICOMOS) en donde en años sucesivos pude ampliar mis conocimientos y enriquecerme con las experiencias y enseñanzas de múltiples colegas de otros países.

3. LA FOTOGRAMETRÍA ESTEREOSCÓPIA ANALÍTICA

Los sistemas analógicos, basados en instrumentos de restitución de funcionamiento mecánico, tenían enormes limitaciones al no permitir ninguna corrección a las deformaciones de las imágenes respecto a las perspectivas teóricas. Por ello era obligado el uso de fotografías métricas y para obtenerlas el empleo de pesadas y engorrosas cámaras fotográficas. Las fotos debían tomarse siempre en caso "normal" (ejes de las cámaras paralelos y perpendiculares a la base) con el plano de imagen casi paralelo al plano de proyección de la restitución con menos de 5° de desviación, etc. El uso de complejos calculadores mecánicos permitía las tomas con inclinación vertical de ángulos fijos, pero a costa de pérdidas de precisión y complejas operaciones de orientación de los pares estereoscópicos.

En esos momentos acababan de irrumpir los ordenadores personales que permitieron, por su velocidad de cálculo, el desarrollo de la fotogrametría analítica. Los restituidores dejaron de ser complejos instrumentos mecánicos que reproducían físicamente mediante barras los rayos proyectivos, para convertirse en simples instrumentos de medición de coordenadas planas de los puntos homólogos en las fotografías que el ordenador transformaba mediante cálculo matemático en coordenadas tridimensionales del objeto. La orientación de las fotos se hacía también por cálculo en breves instantes reduciendo errores y posibilitando cualquier orientación de las fotografías. La toma fotográfica dejó de tener restricciones en el giro de las cámaras respecto al plano de proyección del dibujo.

Al poco tiempo de la creación del Gabinete de Fotogrametría el Ministerio adquirió un restituidor analítico Wild Aviolyt BC2. Inicialmente, aunque el sistema guardaba un archivo digital del dibujo, este

sólo se podía visualizar mediante un trazador gráfico sobre papel. Con el nuevo instrumento pudimos expandir nuestra actividad, tanto cuantitativa como cualitativamente. Uno de los primeros trabajos que realizamos con él fue una cartografía de la Alhambra para la redacción del primer Plan Especial del conjunto monumental. A semejanza de lo hecho catorce años antes en Albarracín, se dibujó no solo la planta topográfica sino también alzados y secciones del conjunto e incluso alguna axonometría (Fig. 5).

Poco después, mi actividad profesional sufrió un cambio sustancial pues en 1987 pasé a desarrollar actividades de investigación en arquitectura islámica en la Escuela de Estudios Árabes de Granada, dependiente de Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Con la experiencia de los años anteriores mi convicción sobre la necesidad de seguir usando la fotogrametría como sistema de documentación arquitectónica, imprescindible para poder desarrollar una investigación eficaz lo mismo que para abordar cualquier restauración, me llevaron a replantear la metodología de los levantamientos. En mi nuevo centro de trabajo no existía ningún equipamiento y las posibilidades económicas eran manifiestamente inferiores a las que tuve en el Ministerio de Cultura. Pero la tecnología había cambiado lo suficiente como para poder plantear una nueva filosofía. No sólo necesitaba instrumentos más baratos, sino que debían ser más ligeros y fáciles de manejar. A partir de este momento mi obsesión fue poder usar la fotogrametría en cualquier lugar y circunstancia sin tener que recurrir a montar un "safari" de porteadores de pesados equipos que obligaban a una complicada logística, como hasta entonces ocurría. Afortunadamente, la evolución tecnológica permitía avanzar por ese camino (Almagro 1993, 1999, 2002). Inicialmente adquirí un teodolito electrónico y desarrollé un programa informático para cálculos topográficos especialmente adaptado a los levantamientos de arquitectura combinando esas mediciones con rectificaciones fotográficas rudimentarias realizadas con una ampliadora de cuarto oscuro.

En los primeros trabajos en mi nuevo destino pude aún contar con los equipos del Ministerio para dos proyectos que coordiné para la Junta de Andalucía. Uno fue un programa de documentación fotogramétrica dentro del Plan Andaluz de Catedrales. Se realizó una toma sistemática de fotografías terrestres y aéreas de las catedrales andaluzas con las cámaras del Gabinete de Fotogrametría del ICRBC obteniendo cientos de fotografías métricas. Mis contactos con el Ejército del Aire de cuando los trabajos llevados a cabo en Jordania me permitieron involucrar al escuadrón Cartográfico y Fotográfico en la realización de vuelos a baja altura obteniendo fotografías a escala 1/1000 con las que era posible alcanzar escalas de restitución de hasta 1/200 e incluso forzando con comprobaciones y mediciones de campo, llegar a 1/100. De este modo se podían

obtener plantas y perfiles de las cubiertas de las catedrales totalmente acordes con las restituciones de las fotos tomadas desde el suelo. Estas fotografías fueron después restituidas en distintas fases por distintos equipos según se fue requiriendo para la redacción de planes directores o de proyectos de restauración (Almagro y Salmerón 1993). El otro proyecto desarrollado enteramente por mí fue la restitución de un plano topográfico a escala 1/100 del conjunto arqueológico de Madinat al-Zahra' que luego complementé con una concienzuda revisión de campo y la realización de alzados de las ruinas con fotogrametría terrestre (Fig. 6) (Almagro 1992).

Tras la compra del teodolito electrónico, la siguiente adquisición, con cargo a un proyecto de investigación, fue la de un restituidor analítico de pequeño formato (fotogramas de 6 x 6 cm) Adam MPS2. El software incorporado en los sistemas de fotogrametría analítica permitía corregir deformaciones sistemáticas de las imágenes con lo que se dio entrada al uso de las llamadas cámaras semi-métricas. Estas eran cámaras de fabricación estándar, normalmente de formato 6 x 6 cm, que con unas simples modificaciones (inserción de una placa con retícula *reseau* y un sistema de bloqueo del enfoque) y un proceso de calibración (determinación de la distancia principal, del punto principal referido a la *reseau* y de los coeficientes de un polinomio de corrección de la distorsión de la óptica del objetivo) permitían obtener prestaciones similares a las de las cámaras métricas. Adquirí al principio una Rollei 6006 *metric*, aunque después fui capaz de transformar y calibrar otras cámaras, sobre todo a partir de las Hasselblad SWC de 38 mm de focal y formato de 6 x 6 cm, gracias a la colaboración con colegas del CIPA.

A finales de los años ochenta aparecieron los programas de CAD y aunque inicialmente tuve que desarrollar un software específico para transformar los archivos de dibujo generados por el restituidor en archivos dxf, pronto la interconexión entre ambos sistemas fue una realidad de modo que los instrumentos de restitución pasaron a ser digitalizadores 3D de un modelo virtual tridimensional, conectados al CAD, que lo registraba y representaba en el monitor o en el trazador gráfico. De este modo las proyecciones finales de las representaciones podían elegirse libremente mediante el sistema de CAD. Aquel software lo desarrollé igualmente para el restituidor Aviolyt BC2 del Ministerio, de modo que algunos trabajos de los que allí realicé los pude convertir en dibujos de AutoCAD, pues a partir de ese momento pasé a realizar todos mis dibujos digitalmente.

Unos años después, el CSIC me facilitó la financiación para adquirir un restituidor analítico de gran formato, un Leica SD2000, de prestaciones similares a las que tenía el del ICRBC. Con él volvía a disponer de los instrumentos adecuado para realizar cualquier tipo de

levantamiento, aunque con cámaras fotográficas más versátiles y ligeras que permitían realizar las tomas de datos con mayor rapidez y desde lugares no alcanzables con los pesados equipos métricos. Esto nos permitió abordar grandes proyectos de documentación planimétrica como fueron los del Alcázar (Figg. 7 y 8), la Catedral (Fig. 9 y 10) y la colegiata del Salvador de Sevilla (Fig. 11) que dieron lugar a una extensa colección de 120 planos que se presentaron en sendas publicaciones de gran formato (Almagro 2000a, 2007, 2008) a las que luego se sumó la de la Cartuja de Granada (Fig.12) (Almagro 2010).

Al mismo tiempo, el trabajo cotidiano de investigación fue generando una cantidad muy numerosa de planos y dibujos, siempre en formato digital, que junto a las fotografías hoy constituye una base de datos, sobre todo de arquitectura andalusí, de gran relevancia y que he comenzado a poner a disposición de otros usuarios a través del repositorio de Digital.CSIC (Figg. 13-15).

Las posibilidades de cálculo que brindaban los ordenadores permitió un desarrollo de la fotogrametría analítica al margen de la mera restitución mediante visión estereoscópica. Los iniciales sistemas de aereotriangulación para el ajuste y orientación de bandas de fotogramas aéreos que permitían el cálculo de coordenadas de puntos de control para la orientación de múltiples pares de fotogramas a partir de unos pocos puntos de apoyo dieron paso a programas más complejos de ajustes de haces de bloque de fotografías de ejes convergentes. A través del CIPA tuve conocimiento de esos sistemas y pude adquirir y usar dos programas de este tipo. Uno fue ORIENT desarrollado en la Universidad Técnica de Viena (TUW) por el Dr. Kager. Con él llevé a cabo distintas experiencias tanto de obtención de puntos de control de series de fotografías para la posterior orientación de pares estereoscópicos como de calibración de cámaras semimétricas. Disponer de un gran número de fotografías en las que aparecen los mismos puntos del objeto permite contar de un mayor número de datos que los indispensables para el cálculo y ajuste de la orientación de las imágenes. Esta redundancia hace posible que lo que en los sistemas de ecuaciones son datos puedan convertirse en incógnitas a calcular buscando unos mejores resultados en procesos basados en los mínimos cuadrados. De este modo partiendo de unos valores aproximados se puede llegar a determinar valores precisos de los parámetros de calibración (distancia principal, posición del punto principal y coeficientes de distorsión). Por este procedimiento calibré varias cámaras transformadas en semimétricas, como antes se indicó. Para adquirir los datos necesarios usábamos el restituidor ADAM como monocomparador con el que medíamos coordenadas de la imagen que luego se introducían en el proceso de cálculo lo que resultaba un poco engorroso. Posteriormente se adquirió el programa MAAS-CR adaptado al restituidor Leica que

hacia el proceso mucho más fluido e interactivo al poderse introducir simultáneamente muchas fotografías de formato 6 x 6 en los portafotogramas preparados para fotos aéreas de 23 x 23 cm. Con estos procedimientos pudimos realizar, entre otros trabajos, la orientación simultánea de 48 pares estereoscópicos de las bóvedas de la catedral de Sevilla a partir de sólo 28 puntos de control medidos con taquímetro y obteniendo coordenadas de 150 puntos de paso (Fig. 16)(Almagro 1997).

4. UNA NUEVA ERA: LA FOTOGRAMETRÍA DIGITAL

Coincidiendo con el final del siglo XX se extendió también en fotogrametría el uso de las fotografías digitales provenientes de dos orígenes. Por un lado, las generadas a partir de fotografías tradicionales digitalizadas mediante escáner y por otro lado las producidas mediante cámaras dotadas de sensores tipo CCD y más tarde CMOS. Pronto cámaras comerciales de este tipo estuvieron disponibles a precios cada vez más asequibles. Las imágenes digitales cuentan con grandes ventajas para su uso fotogramétrico. En primer lugar, podemos decir que llevan incorporada en sí mismas la métrica de todos sus puntos. Basta con que señalemos un pixel para conocer sus coordenadas de imagen definidas por la fila y la columna que ocupa en la matriz y que se puede referir al centro de la imagen o a cualquiera de los vértices. Además, al tratarse realmente de una matriz numérica no se alteran ni sufren deformaciones ni con el tiempo ni por acciones externas. Esto hace innecesario disponer de costosos sistemas para medir con precisión en las imágenes lo que ha traído consigo un notable abaratamiento de los sistemas fotogramétricos.

Es cierto que la calidad métrica de la imagen depende de cómo se haya generado. Un escáner corriente no garantiza la conservación de la geometría de una fotografía métrica o semimétrica en él escaneada por lo que si queremos hacer uso de imágenes métricas deberemos escanearlas con instrumentos de precisión bastante costosos. No obstante, este es un procedimiento que se utiliza para poder seguir usando las fotografías de archivos fotogramétricos creados en el pasado. Pero en las cámaras digitales el sensor es un elemento que se considera que no sufre alteraciones dimensionales por lo que la imagen en él producida se mantiene inalterable. Por ello, cualquier cámara digital puede asimilarse a una cámara semimétrica siempre que mantengamos la óptica fija y la calibremos.

Estos principios y propiedades facilitaron una verdadera revolución en la fotogrametría a partir de los inicios de este siglo al poder prescindir de costosos instrumentos para la toma fotográfica y para la medición. Todo ha quedado reducido al uso de cámaras

fotográficas que pueden adquirirse en cualquier comercio y cuya resolución ha ido en constante aumento sin apenas alteración de precio y de software cada vez más sofisticado y potente que solo precisa de ordenadores con prestaciones medias: casi cualquier ordenador de los usados para juegos es válido para estos fines. Se puede decir que lo que yo buscaba casi desde mis primeras experiencias hoy es totalmente alcanzable: disponer de sistemas con los que poder realizar un levantamiento gráfico totalmente transportable a cualquier lugar y utilizable casi en cualquier circunstancia.

Aunque hubo pronto en el mercado sistemas de fotogrametría digital, en los primeros tiempos su precio era también elevado. Pero a través del CIPA tuve acceso a sistemas desarrollados en universidades y centros de investigación que pude utilizar primero con el fin de evaluarlos y después como colaborador haciendo sugerencias como usuario y traduciendo sus instrucciones y los mensajes del interfaz de usuario para su uso en español. Primero fue el VSD desarrollado por el Prof. Jachimski de la Universidad AGH de Varsovia (Almagro 2000b) y después el Poivilliers F del ingeniero Ives Egels del IGN de Francia. El primero muestra el par estereoscópico en la pantalla, una imagen en cada mitad de ella, que deben ser observadas mediante un estereoscopio de espejos. El sistema sobrepone un cursor en cada imagen que se ven como marca flotante que se mueve en el espacio virtual y con la que se va dibujando. Para monitores grandes de sobremesa usamos un estereoscopio de espejos de los que se usaban en fotointerpretación de imágenes aéreas, sujeto en un soporte adecuado. Para el uso en ordenadores portátiles construí pequeños estereoscopios *ad hoc* que permitían usar el sistema en cualquier lugar al que pudiera llevarse el portátil. El problema de este sistema es que estaba escrito para MSDOS y aunque funcionaba bajo Windows, las versiones más recientes de este sistema operativo han dejado de soportar aplicaciones del viejo sistema. Aunque se puede seguir usando con un simulador resulta sumamente engorroso. PoivilliersF es más moderno y está escrito para Windows. Este sistema superpone ambas imágenes en el monitor, bien filtradas para ser observadas con gafas de anáglifos o bien alternadas para su visualización en un monitor con propiedades para visión estereoscópica con gafas activas de oclusión. En este caso, además del monitor y las gafas se precisa una tarjeta gráfica tipo NVidia Quadro. En ambos sistemas el dibujo restituído se presenta en 3D sobrepuesto al modelo estereoscópico y puede ser exportado posteriormente a AutoCAD. También participé en la mejora y difusión del programa ASRix desarrollado por Steve Nickerson para realizar rectificaciones fotográficas que igualmente he utilizado con asiduidad.

Progresivamente y a medida que las cámaras digitales fueron teniendo mayor resolución fuimos usando más

los sistemas digitales de modo que en 2018 los restituidores analíticos de la Escuela de Estudios Árabes han quedado fuera de uso. Durante estos años hemos realizado innumerables trabajos utilizando estos medios usando fotografías métricas y semimétricas escaneadas lo mismo que fotos digitales. Así, gran parte del levantamiento de la colegiata del Salvador de Sevilla fue realizado con VSD y otros, como los alzados de la mezquita de Córdoba (Figg. 17 y 18), se han hecho con Poivilliers F.

También la fotografía digital causó enseguida innovaciones en los sistemas de ajuste de haces pues al integrarse la medición sobre las fotos en el programa informático todo el proceso resulta interactivo facilitando la reobservación y corrección de errores. Por otro lado, el avance en los sistemas de cálculo y en la potencia de los ordenadores ha permitido la aplicación de procedimientos como la correlación para la detección de puntos homólogos y la automatización de los procesos.

En nuestra experiencia utilizamos inicialmente la aplicación Orthoware desarrollada por la empresa Metria asesorada por la Universidad Politécnica de Valencia. Este software permite la orientación de bloque de fotografías digitales para después generar de forma automática nubes de puntos por correlación automática. A partir de estas se crean mallas de las superficies, que pueden texturizarse y de las que se obtienen ortoimágenes mediante la proyección del modelo 3D así formado. Inicialmente nuestro interés por este software se centró en usarlo como los antiguos programas de ajuste de haces, para calibrar las cámaras digitales que seguíamos usando en restituciones estereoscópicas, y para obtener puntos de control en todo el edificio u objeto a restituir, a partir de unos pocos puntos de control medidos con procedimientos topográficos, o incluso con meras mediciones lineales y observaciones en el terreno. Es decir, mejorando y extendiendo procedimientos simplificados de levantamiento fotogramétrico que ha seguido siendo uno de nuestros objetivos durante todos estos años.

La aparición del software Photoscan de la firma Agisoft, recientemente rebautizado como Metashape, vino a introducir notables mejoras en el procedimiento al automatizar prácticamente todo el proceso, ya que la detección inicial de puntos homólogos y el cálculo de las orientaciones de las fotografías se realiza sin la intervención del operador.

Estos programas, que se suelen también denominar de escaneado fotogramétrico, permiten generar modelos tridimensionales a partir de nubes de puntos, a semejanza de lo que se obtiene con los escáneres de láser. Debo resaltar que hasta el momento no he hecho mención de estos procedimientos de medición. Esto se debe a que ha sido escasísimo el empleo que he hecho de ellos y que nunca he contado con un instrumento de

este tipo. Cuando he hecho algún trabajo o prueba ha sido con la colaboración de otros colegas. La razón fundamental de haber renunciado a su uso estriba en que hasta ahora los escáneres de láser incumplían las premisas que me he fijado para mis trabajos de levantamiento gráfico: procedimientos sencillos con instrumentos de bajo coste, fáciles de transportar a cualquier lugar y en cualquier situación. Hasta muy recientemente los escáneres de láser eran equipos pesados, que requerían varias personas para su transporte, planteaban dificultades de estacionamiento y manejo, por ejemplo, en andamios o desde lugares con dificultad de acceso, y han sido equipos de coste muy alto. Su traslado a determinados países puede presentar complicaciones en las aduanas, etc. Una cámara digital compacta y un distanciómetro de láser tipo Disto se pueden llevar en un bolsillo o sujetos al cinturón y permiten incluso hacer un levantamiento de forma discreta, pudiendo pasar, quien lo hace, desapercibido, como si se tratara de un simple turista. Esta no es una cuestión baladí en determinados países y circunstancias donde conseguir un permiso para realizar las mediciones resulta a veces farragoso y en ocasiones imposible y en general requiere una importante pérdida de tiempo en gestiones burocráticas.

Los sistemas hoy disponibles permiten realizar multitud de trabajos con medios realmente simples. Desde hace algunos años utilizo una cámara compacta Ricoh GR de óptica fija gran angular equivalente a 28 mm con resolución de 16 Mpixeles. La acompaño con un distanciómetro Leica Disto X4, con visor digital para poder hacer puntería en ambientes luminosos en que no puede verse el rayo láser. Este distanciómetro incorpora un inclinómetro que permite usarlo como nivel (con precisión de 0.1°) que utilizando un trípode fotográfico permite realizar apoyos de campo, de no excesiva precisión, es cierto, pero suficiente para la mayoría de los casos de trabajos de investigación e incluso de restauración. Todo puede transportarse como equipaje de mano y su uso resulta discreto. Con los datos obtenidos en campo y el software, ya sea de restitución estereoscópica o de escaneado fotogramétrico, se pueden realizar levantamientos gráficos de casi cualquier envergadura. Lo que hace cincuenta años requería de sofisticados y costosos instrumentos de manejo muy complejo, hoy se logra con medios domésticos asequibles a un profesional y no digamos a cualquier departamento académico o centro administrativo.

De todos modos, hay que recordar que los modelos 3D generados por estos procedimientos o mediante un escáner láser e incluso las ortoimágenes son un material bruto que requiere de procesos interpretativos y de elaboración gráfica (Almagro y Almagro 2007). El valor del dibujo como medio de expresión no ha perdido vigencia ni puede ser sustituido de forma radical por las imágenes generadas por la aplicación informática. El

dibujo elaborado de acuerdo con las normas de la geometría descriptiva requiere un análisis previo de la realidad, su comprensión e interpretación y su expresión sintética a través fundamentalmente de líneas. Aunque es cierto que una ortoimagen contiene mucha más información que el dibujo, precisamente por ello puede resultar más confusa y menos expresiva.

Lo que con más frecuencia utilizo es una combinación de la imagen ortográfica con textura fotográfica y el dibujo vectorial, bien superpuestos (Figg. 15 y 19), bien en presentación paralela (Fig. 17). Esto permite que el dibujo exprese el análisis sintetizado y la imagen aporte los detalles de color, textura y elementos de segundo o tercer nivel cuya representación vectorial requiere de un enorme esfuerzo de trabajo sin aporta un valor proporcional al dibujo. Lo habitual es que en presentaciones sobre papel imprima ambos dibujos separado y en documentos digitales (dwg o pdf) lo haga en capas distintas superpuestas que pueden ser activadas o desactivadas a voluntad. En todo caso, la línea vectorial superpuesta sobre la imagen siempre le aporta claridad y precisión al documento gráfico.

Dentro de las recientes innovaciones disponibles para la realización de levantamientos arquitectónicos está el uso de drones para tomas fotográficas desde el aire. Esto permite que podamos prescindir del uso de las fotografías aéreas métricas logrando además escalas más grandes en los levantamientos y poder fotografiar zonas antes inalcanzables. Entre los trabajos recientes que he realizado usando un dron puedo mencionar el levantamiento del yacimiento arqueológico de Volúbilis, en Marruecos. A partir de 3.100 fotografías pude generar un modelo 3D y con éste una ortoimagen con resolución de 1 pixel = 3 cm del terreno para una

superficie de más de 50 Ha. La imagen final tiene 30.000 x 30.000 pixeles (Fig20).

Mi actividad en estos últimos años ha prestado una especial atención a los países del Norte de África, en especial a Marruecos (Almagro 2013). Aparte de actividades dentro de proyectos concretos de investigación he tratado de suplir el vacío documental existente puesto que desde la época del Protectorado muy poco se ha avanzado en documentar su rico patrimonio y sobre todo en poner a disposición de la comunidad científica la documentación disponible. Así, casi todos los monumentos importantes que he tenido ocasión de visitar los he documentado tomando pares estereoscópicos o tomas más extensas de bloques de fotografías para generar modelos 3D. Especialmente relevantes han sido los trabajos hechos en las grandes mezquitas históricas de Marruecos, la *Qarawiyyin* de Fez (Fig. 21) y la *Kutubiyya* de Marrakech (Fig. 22), así como la almorávide de Tremecén en Argelia.

Con independencia de que muchos de estos dibujos los he ido publicando en artículos y monografías científicas, estoy procediendo a colocar todo este material gráfico generado a lo largo de mi actividad profesional en el repositorio del CSIC (<https://digital.csic.es/handle/10261/176807>), con el fin de que quede a disposición de otros investigadores o responsables de la conservación del patrimonio. Sin duda, esta labor deberá proseguirse mejorando nuestros sistemas de información y conocimiento como mejor modo de garantizar la conservación de nuestro patrimonio.