



Pablo Rodríguez-Navarro
He is Technical Architect, Art Historian and Building Engineer. Professor of Photography, Photogrammetry and Architectural Survey in the Graphic Expression Department, Universitat Politècnica de València (Spain). Interested in digital survey, using photogrammetry, 3D laser scanner and drones, image post-processing and 3D computer graphic.



Pedro M. Cabezos-Bernal
Phd. Architect and Professor at the Universitat Politècnica de València in the Graphic Expression Department. His research line is focused on new representation techniques such as 3D modelling, virtual reality, immersive photography, photogrammetry SfM (Structure from Motion) and ultrahigh resolution photography.



Teresa Gil-Piqueras
She is Technical Architect, Materials Engineer and Building Engineer. Professor in the Graphic Expression Department at the Universitat Politècnica de València (Spain). Interested in vernacular architecture documentation and digital survey with photogrammetry and scanner laser 3D technologies.

Using drones under 250 g for documenting the architectural heritage

The emergence of drones in recent years has revolutionized the field of photogrammetry due to the advantages that their use entails, opening a new variety of possibilities, as the use of close-range aerial photogrammetry. Therefore, the main objective of this contribution is to analyse the legal limits for this kind of drones under 250 g and to determine the quality of the results that can be obtained when they are used for graphic surveying. The methodology consisted in carrying out the survey of a renaissance courtyard, which is known as the *Patio del Embajador Vich*, one of the most relevant spaces in the city of Valencia that is currently integrated inside of the *Museo de Bellas Artes de Valencia*. The courtyard constitutes an excellent test bench due to the complexity of its sculptural forms and its combination with the large stucco panels. The photogrammetric survey was carried out with a DJI mini 2 drone, weighting less than 250 gr, equipped with a 1/2.3" CMOS sensor

with a resolution of 12 Mp. In addition, a survey with a laser scanner Leica RTC 360 was also carried out to compare both of them and to estimate the precision of the photogrammetric survey. Two types of photogrammetric surveys were carried out, the first of which was taken at a medium distance to achieve the restitution of part of the general volume, while the second consisted of a very close-range survey of one of the original capitals, in order to restore a more detailed model. The conclusions of this study, that arises from the comparison and study of the models obtained, will reveal the convenience of using this kind of drones and its application to architectural heritage surveying.



Manuel Giménez Ribera
Professor at the Universitat Politècnica de València in the Graphic Expression Department. Phd. Architect. He participates as a researcher in several competitive research projects focused on the study of architectural graphic expression and design, as well as in the intervention in the patrimony. Scientific publications in indexed journals. Architecture Award of the COACV 2001-2002. Concessionaire entity: Official College of Architects of the Valencian Community. May 10, 2003.

Keywords:
Drone, photogrammetry, survey

INTRODUCTION

Multi-image photogrammetry (SfM), together with the laser scanner, are the most widely techniques that are being used nowadays to undertake the surveying works and to document the architectural heritage. The emergence of drones in recent years has revolutionized the field of photogrammetry due to the advantages that their use entails compared to much more expensive techniques such as traditional aerial photography. In addition, a new variety of possibilities is opened, as the use of close-range aerial photogrammetry, allowing highly controlled shots thanks to the enormous maneuverability of these devices and their ability to remain static in the air. Many other researchers, such as Bakirman et al. 2020, Adami et al. 2019 or Carnevali et al. 2018, have also been able to see the advantages of this type of drone in the documentation of architectural heritage.

The initial freedom for flying drones, due to the lack of a specific normative, became a legal barrier very difficult to overcome with the current regulations, which require being a registered operator, obtaining special piloting licenses and contracting risk insurances. However, recent changes in European regulations [1] make it less rigid when it comes to drones weighing less than 250 grams. Therefore, the main objective of this contribution is to analyse the legal limits for this kind of drones and to determine the quality of the results that can be obtained when they are used for graphic surveying. In addition, a comparative analysis of the drones under 250g currently available on the market has been carried out, analysing their main characteristics and features.

In order to test the suitability of this type of aircrafts for the practice of photogrammetry, a real case study has been carried out, specifically the *Patio del Embajador Vich*, one of the most relevant spaces in the city of Valencia, currently integrated within the *Museo de Bellas Artes de Valencia*. The building constitutes a perfect test bench due to the complexity of its sculptural forms and its combination with the large stucco panels. The photogrammetric survey has been carried out with a DJI

Mini 2 drone weighing less than 250 g. At the same time, a survey with a laser scanner has been carried out in order to compare the accuracy of the photogrammetric work. The conclusions of this study will reveal the convenience of using this type of drones for surveying architectural heritage.

SPECIFIC REGULATIONS FOR DRONES WEIGHING LESS THAN 250G

The applicable regulations for drone flights depend on the country. In the European Union, regulations (EU) 2019/947 and (EU) 2019/945 must be complied in addition to those specific rules that can be established by each member state. For instance, in the case of Spain, the *Agencia Estatal de Seguridad Aérea española* (AESA) requires that all users who intend to fly a drone with a camera, regardless of its weight, must be registered as an operator. This registration is simple and free and can be obtained online at the AESA website [2]. The operator number must be included in the drone in a visible way.

Regarding the airspace control, regulation (EU) 2019/947 defines three types of operations: open, specific, and certified. The open category (category A), classified as low risk, does not require prior authorization or declaration and is subdivided into three subcategories or scenarios; A1, A2, and A3, with specific regulations. Drones under 250g should be classified as C0 (CE Marking) and can operate under the open subcategories A1 & A3, being the A1 the less restrictive.

In A1 subcategory there are some limitations such as keeping the drone within the visual range, not exceeding 120 meters above the flight surface, not flying over concentrations of people while also keeping a safe distance from them.

It must be considered that in order to fly any drone it is necessary to pass a pilot exam that depends on the scope of the operation. In the case of drones under 250g, it is necessary to pass a very simple A1/A3 subcategory exam in which it must be proven that the pilot is familiar with the drone user's manual provided by the manufacturer. The training and exam are free and can be taken online [3].

It should be noted that in the open category the airspace is also limited and there are several applications and websites that indicate such restrictions [4]. In addition to this, in accordance with articles 11 and 127 of the Spanish Air Navigation Law, an insurance must be contracted to cover the risks that may arise during each flight (both for recreational and professional purposes). However, the draft of the Spanish Royal Decree on UAS (Unmanned Aircraft Systems), which is currently being processed, will exempt from the mandatory insurance requirement class C0 UAS and those without class marking with a maximum take-off mass of less than 250g operated in subcategory A1.

Finally, it must be insisted that what is mentioned above has the sole objective of bringing the reader closer to the obligation to comply with legal regulations and to make it clear that, although the legal requirements are less restrictive for lightweight drones, this does not mean that anyone can fly freely, but the regulations established by each country must be consulted and complied with [5].

COMPARATIVE ANALYSIS OF CURRENT LIGHTWEIGHT DRONES

In this section, a selection and analysis of drones, weighing less than 250g, which may be suitable for photogrammetric surveying, is carried out. Since these kinds of aircrafts are mainly focused on recreational use, many cheaper drones can be found on the market, but they have been discarded because they do not have a camera with enough resolution and quality for their application to the photogrammetry.

After analysing the features of the drones currently available on the market, a total of 8 drones that may be of interest have been selected. Most of the models are developed by brands which are specialized in the construction of drones, such as DJI and Autel. Nevertheless, other brands have been taken into consideration, such as Hubsan and Xiaomi, which offer cheaper devices that are also interesting, as will be seen below.

DJI MINI 2

This model (Fig.1) is a best seller for being backed by the quality offered by DJI, one of the main drone manufacturers. The Mini series began to be manufactured in 2019 with the arrival of the Mavic Mini. The main objective of the company was creating a lightweight drone capable of producing high-quality images and videos. The Mini 2 replaced the initial model, which is now discontinued, and introduced improvements in video quality and especially in terms of flight safety.

The features of this drone are adequate, it has a camera with a 12 Mp sensor with a size of 1/2.3". The focal length and the diaphragm aperture in the cameras of this type of drone are always fixed. The Mini 2's camera has a 24mm equivalent focal length with an f2.8 aperture. The focus is also fixed in this model. The 3-axis gimbal provides perfect stabilization and there is a bottom collision detection, but the drone lacks front and rear sensors. Flight autonomy is 30 minutes (flight at 4.7 m/s and no wind).

Although this model is still available on the market, DJI has recently released a new model, the Mini 3, which has some improvements, as described next.

DJI MINI 3 PRO

One of the most remarkable advances of this drone (Fig. 2) with respect to its predecessor is the integration of a new camera with a larger sensor (1/1.3") and higher resolution (48 Mp). The camera maintains the same focal length (24mm), although it is brighter (f1.7) and has autofocus. The drone also includes improvements in obstacle detection with the incorporation of front and rear sensors that provide much more flight safety. As for the duration of the battery, the autonomy is slightly expanded to 34 minutes. Optionally, a controller with its own screen can be bought to avoid using a smartphone.

Another section in which this device has improved with respect to its predecessor is the expansion of the gimbal's controllable tilt range and the ability of allowing a portrait capture mode, a feature that makes it unique among all the analysed models.



Fig. 1 -DJI Mini 2.



Fig. 2 - DJI Mini 3 Pro and optional commander with dedicated display.

In relation to the camera, it is worth mentioning that DJI has incorporated a sensor with a Quad Bayer type filter (Fig. 4), surely as a compromise solution to increase resolution and to try to minimize noise, especially in video recording.

The noise in an image depends, among other factors, on the SNR (Signal to Noise Ratio), so the higher this value, the less visible noise in the image is produced. In this sense, it is advisable that the sensor cells should be as large as possible to capture more photons, thus minimizing the signal differences captured between the cells and therefore reducing the noise in the image. In the Mini 3, the resolution has been quadrupled compared to the Mini 2 and, despite the fact that the sensor is larger, the size

of the cell decreases. This circumstance will also decrease the SNR ratio. However, by having a Quad Bayer filter, noise will be controlled when working at lower resolutions, such as 4K video and 12Mp still photos. In these cases, the technique known as pixel binning is applied, in which the information for each pixel is obtained from the photon count provided by an area of 4 sensor cells, thus significantly improving the SNR. The same pixel binning technique has been implemented in all the analysed drones featuring more than 12Mp as will be seen later. On the other hand, the maximum resolution capture mode (48Mp) can be useful to get more detail when capturing bright scenes, but it will undoubtedly suffer from a higher level of noise in low light conditions.

AUTEL EVO NANO & EVO NANO +

Autel is another important company dedicated to the manufacture of drones and has two models (Fig. 3) that share the same design and flight performance but mounting different cameras. The Nano + version offers a higher performance camera and sensor (50Mp and 1/1.28"). However, the features of the camera of the Nano version are also remarkable (48Mp and 1/2"). The Nano + camera is brighter f1.9 and has autofocus, while the Nano model has a smaller aperture f2.8 and fixed focus. The features of the Nano series are very similar to those of the DJI Mini 3, but the remarkable feature is its new sensor that has an RYYB pattern filter. Unlike the classic Bayer pattern (RGGB), this new filter replaces green with yellow, allowing more light passing through it (40% more light according to the manufacturer). The result is a noise reduction in low light conditions, but it requires a more complex algorithm for data interpolation (demosaicing) and the colour accuracy will largely depend on this process. Just like the DJI Mini 3 sensor, the filter tile covers four cells to apply the pixel binning technique (Fig. 4).

As far as flight autonomy is concerned, it is a bit reduced compared to the previous models, so it has an estimated flight time of 28 minutes. In addition, the controllable manoeuvrability of the gimbal results somewhat inferior to that of the DJI Mini 3.

HUBSAN ZINO MINI, ZINO MINI SE & ZINO MINI PRO

Hubsan is not as recognized as DJI or Autel, but it offers a product with similar features for a lower price. Hubsan has three models that make up the Zino series (Fig. 5). They all share the same design and appearance but differing in aspects such as the absence of obstacle sensors in the Mini and Mini SE models, and the lower-performance camera in the SE model (12Mp versus 48Mp).

Zino series has good specifications and stands out from the rest for its greater flight autonomy (45 minutes in the Mini and Mini SE versions and 40 minutes in the Mini Pro version). However, it seems that the manufacturer considers it a drone oriented mainly to video recording than to photography, since it does not specify either the



Fig. 3 - Autel Evo Nano / Evo Nano +.

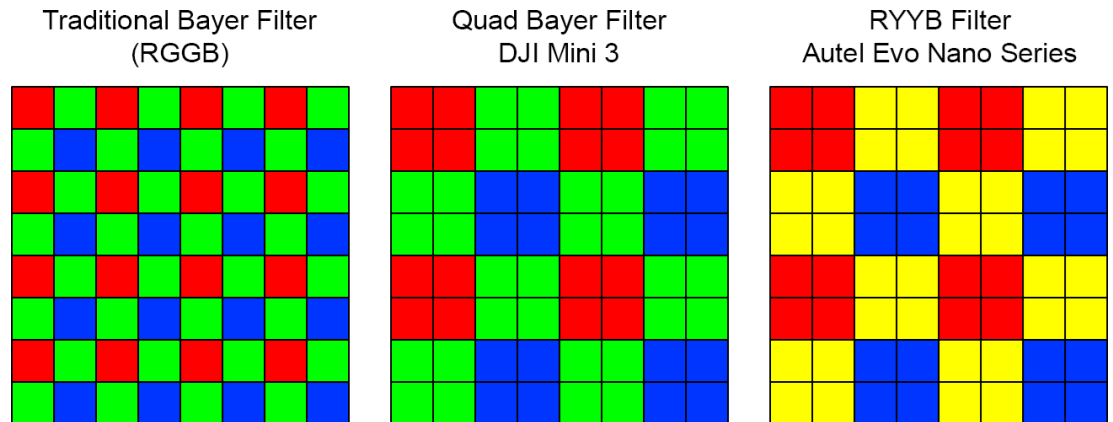


Fig. 4 - Different filter configurations.



Fig. 5 - Hubsan Zino Mini / Zino Mini SE / Zino Mini Pro.



Fig. 6 - Xiaomi Fimi X8 Mini Pro.

Tab. 1 - Comparison table showing the main features of the analysed models.

DRONE	DJI MINI 2	DJI MINI 3	AUTEL EVO NANO	AUTEL EVO NANO +	HUBSAN ZINO MINI SE	HUBSAN ZINO MINI	HUBSAN ZINO MINI PRO	XIAOMI FIMI X8
SENSOR	1/2.3"	1/1.3"	1/2"	1/1.28"	1/2.6"	1/1.3"	1/1.3"	1/2.6"
FOCAL DIST.	24 mm	24mm	24mm	23mm	23mm	24mm	24mm	26mm
APERTURE	f2.8	f1.7	f2.8	f1.9	f1.9	f1.85	f1.85	f2
RESOLUTION	12Mp	48Mp	48Mp	50Mp	12Mp	48Mp	48Mp	12Mp
RAW	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No [6]	Yes
VIDEO	4K 30fps	4K 60fps	4K 30fps	4K 30fps	4K 30fps	4K 30fps	4K 30fps	4K 30fps
GIMBAL TILT	-90° a 20°	-90° a 60°	-90° a 0°	-90° a 0°	-90° a 0°	-90° a 0°	-120° to 45°	-90° a 0°
COLLISION SENSORS	Bottom	Bottom Front Rear	Bottom Front Rear	Bottom Front Rear	None	None	Bottom Front Rear	None
AUTONOMY	32 min	34 min	28 min	28 min	45 min	45 min	40 min	31 min
RANGE [7]	10 Km	7-12 Km	10 Km	10 Km	10 Km	10 Km	10 Km	8 Km
PRICE [8]	459 €	829 €	649 €	869 €	350 €	469 €	600 €	404 €

resolution in pixels or the aspect ratio in static shots. Certain capture features are being refined through software updates, which are expected to make available Raw capture, which is currently not properly implemented.

XIAOMI FIMI X8 MINI PRO

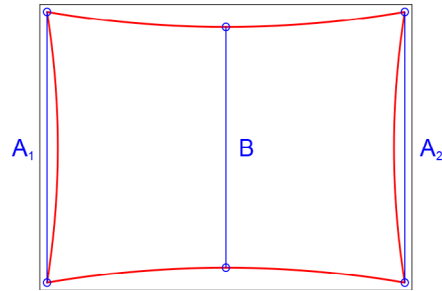
The Chinese firm Xiaomi has started its journey in the manufacture of drones thanks to its association with the company Fimi, launching this lightweight model on the market that becomes the most economical alternative to the rest of competitors.

The camera and specifications of this drone (Fig. 6) are very similar to those featured by the DJI Mini 2. It has a 26mm focal length camera with a 12MP 1/2.6" Sony sensor. It lacks anti-collision sensors, although it uses the lower camera to detect the landing pad. It is advisable buying the Pro battery instead of the standard one, which is heavier and makes the aircraft weigh more than 250g, so it could not be used under the legal conditions of this category.

Table 1 shows a comparative table with the main characteristics of each of the selected drones.

The features of the different models are quite similar, and the greatest differences are found in the camera resolution. It is important to bear in mind that the maximum resolution should not be the decisive factor in cameras with such small sensors, since the SNR ratio must be assessed. In fact, manufacturers apply the pixel binning technique thinking on an optimal capture at 12Mp. They offer 48Mp in order to obtain more details in still shots in conditions of abundant light and being aware of the commercial pull that a higher resolution has on buyers.

Another parameter that may seem beneficial, in general, is to have a large diaphragm aperture to capture more light. However, in such small cameras the diaphragm is fixed so it cannot be closed as in conventional cameras and manufacturers try to maximize the aperture to capture more light and minimize noise in low light conditions. However, in photogrammetry it is necessary that the images have a good depth of field to have greater overall sharpness.



$$\text{SMIA Distortion (\%)} = 100 \frac{(A-B)}{B}$$

$$\text{Where } A = \frac{(A_1 + A_2)}{2}$$

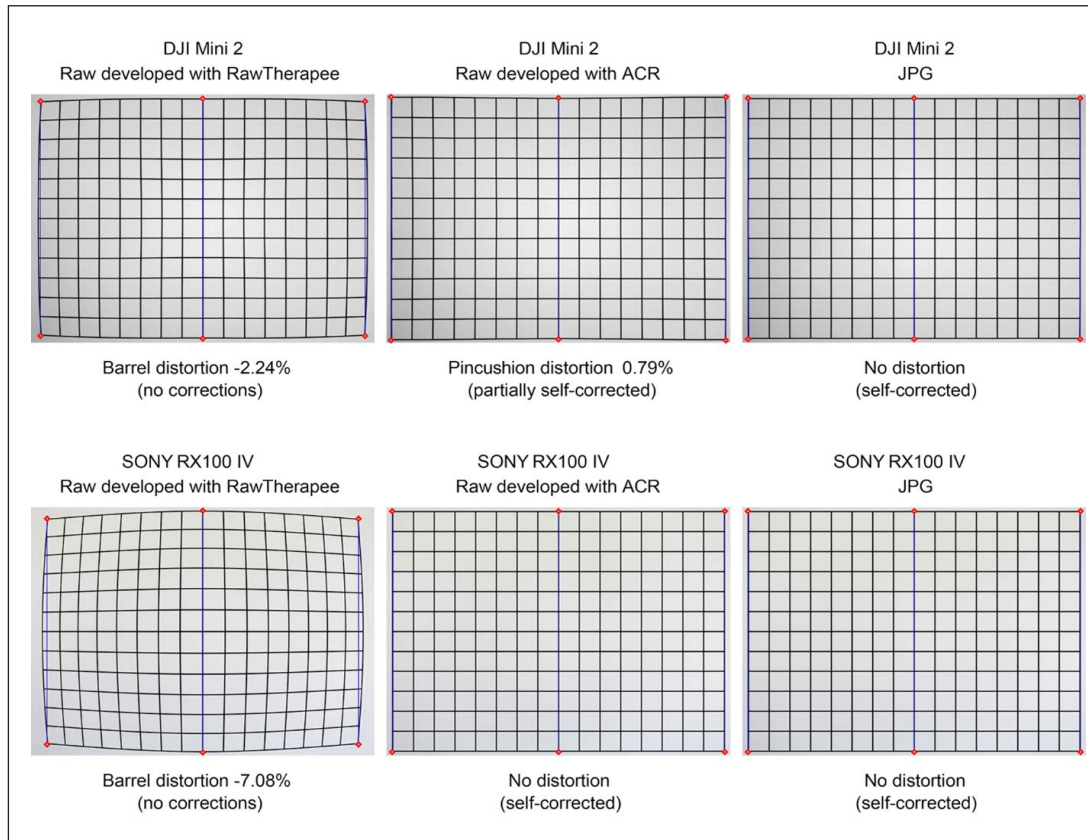


Fig. 7 - Definition of the SMIA Distortion parameter.

Since a closer diaphragm provides a greater depth of field, it would be nice to have a drone whose aperture could be variable in at least two positions, but at the moment no manufacturer offers this possibility in this category.

In the analysis and photographic works that will be exposed onwards a DJI Mini 2 Drone was used. This model has the lowest resolution of all the analysed drones. The main objective is to test if the optical quality of this type of drone is good enough to undertake photogrammetry surveys.

Firstly, an analysis of the optical quality of the lens was performed to evaluate optical aberrations such as radial distortions and to test lens sharpness in comparison with other quality compact cameras, as shown in the following section.

ANALYSIS OF THE OPTICAL QUALITY OF THE DJI MINI 2

In order to test the quality of the optics of this device, the drone was compared to a compact camera of renowned optical quality such as the Sony RX100 IV [9]. As the Sony has a variable focal length lens, it was adjusted during all the tests at the same focal length and aperture as the drone (24mm and f2.8). The Sony camera sensor has slightly more resolution, 17Mp (4:3 format) compared to the 12Mp provided by the DJI Mini 2.

The first test allows measuring the radial distortion of the lens and was carried out by photographing a grid calibration target. Radial distortion was evaluated according to the SMIA standard [Standard Mobile Imaging Architecture [SMIA], 2004]. This standard is also used in the image quality analysis applications developed by IMATEST (2004). The methodology consists in framing a grid, or simply a rectangle, of the same proportion as the image and evaluating the percentual differences between the height of the grid at the borders with respect to its height at the centre. Distortion values are positive for pincushion distortion and negative for barrel distortion (Fig. 7).

Fig. 8 - Radial distortion test - DJI Mini 2 vs Sony RX100 IV.

The results of the tests show that the images, when stored in JPG format, are efficiently processed by the camera software, which totally eliminates the radial distortion produced by the lens (Fig. 8). When the images are stored in RAW format, different results are obtained depending on the developing software. Anyone could expect that a RAW image would show the actual lens distortion. Nevertheless, this is not the case when processing the files with Adobe Camera Raw (ACR). The manufacturer must embed some calibration data in the RAW file that ACR is able to interpret and apply transparently, without the user acknowledgement. When using ACR to develop the picture taken by the Sony camera, the correction is identical to that in the JPG and the image is free of distortions. However, when processing the picture of the DJI drone, the parameters embedded in the RAW should not be very accurate, so ACR produces a partial correction with a slight pincushion distortion (0.79%).

In order to appreciate the true distortion produced by the lens, the raw files were processed with RawTherapee [10], a development software that does not apply any radial distortion correction. In this way, there can be evaluated the real distortion of both cameras. Surprisingly, the DJI drone optics show significantly lower barrel distortion compared to the Sony camera (-2.24% vs. -7.08%), indicating a fairly low distortion for a wide-angle lens. The following test consists in capturing a real scene with both cameras with the same focal length, aperture, speed, and ISO sensitivity. The shutter speed was set to 1/80s, the aperture to f2.8 (imposed by the fixed aperture of the drone) and ISO value to 100. The shots were stored in RAW format to obtain the highest image quality. The files were developed without applying any sharpening filter that could increase the acutance. Figure 9 shows an image comparison including 100% crops to assess the sharpness and details in the central and the border areas of the pictures. The test yields again a pleasantly result in the level of detail achieved by the DJI Mini 2. Despite the Sony RX100's sensor having a higher resolution (17Mp vs. 12Mp), it is difficult to see with

the naked eye the greatest detail achieved by the Sony. On the contrary, a remarkable difference becomes evident in the visible noise in the shadows, where the Sony is clearly superior, especially thanks to the fact that it has a 1" sensor, much larger than the DJI's one, thus providing a higher SNR. Similarly, on a closer inspection, there can be seen slight chromatic aberrations in the form of red and cyan halos in the high-contrast areas of the picture taken by the drone, while in the scene captured with the Sony camera, they are practically imperceptible. Despite this, the aberrations are very well controlled for a camera of these characteristics and the halo width do not exceed one pixel.

The last test shows the effect of vignetting produced by the lens. In order to do so, a white target, uniformly illuminated by natural light, was photographed. The shots were taken in RAW format with identical exposure parameters. It was verified that, as with distortion, ACR applies an automatic vignetting correction, based on the data embedded in the RAW format by the manufacturer. For this reason, RAWTherapee was used to develop the files neutrally, without applying adjustments that could distort the original contrast. A 16-bit TIF was obtained from the raw file, which was analysed with Histogrammar, a very interesting software developed by Luijk (2007). Histogrammar allows visualizing the histogram of an

Fig. 9 - Scene comparison - DJI Mini 2 vs Sony RX100 IV.



image on a logarithmic scale by exposure steps. Thanks to this tool, the light difference between the central area of the image (lighter) and the corner areas (darkened by the vignetting effect), can be measured in EV increments.

As can be seen in Figure 10, the vignetting in the picture taken by the drone is considerably more pronounced than that captured by the Sony camera, which in this section is excellent. The difference between the brightest and darkest areas in the case of the DJI is 1.73 EV, while in the Sony is less than one step. Regardless, the vignetting is not exaggerated and can be corrected at the time of development if desired. In addition, some photogrammetry software such as Metashape can optionally correct this effect automatically.

The previous tests demonstrates that the optical quality of the DJI Mini 2 drone is quite good compared to a high-end compact camera such as the Sony RX100 IV. In the next section, the DJI Mini 2 will be put to the test by carrying out the photogrammetric survey of an emblematic example of the Valencian architectural heritage as will be shown next.

CAPTURE AND PHOTOGRAMMETRIC RECONSTRUCTION METHODOLOGY

The chosen scenery is the *Patio del Embajador Vich*, which is one of the early examples of Renaissance architecture in the Iberian Peninsula. The courtyard was built around 1525 by Jerónimo Vich, who was the ambassador in Rome of King Ferdinand the Catholic. The palace containing the courtyard was demolished in 1859, but the pieces of marble, that its promoter had brought from Genoa for its construction, were scattered throughout various buildings in the city until its reconstruction in 2007 on its new location, the *Museo de Bellas Artes de Valencia*.

Two photogrammetric surveys were carried out, the first of them was taken at a medium distance to achieve the restitution of a facade, while the second consisted in a short distance survey of one of the original capitals, in order to obtain a more detailed model. At the same time, another survey of the courtyard, obtained with a Leica RTC 360

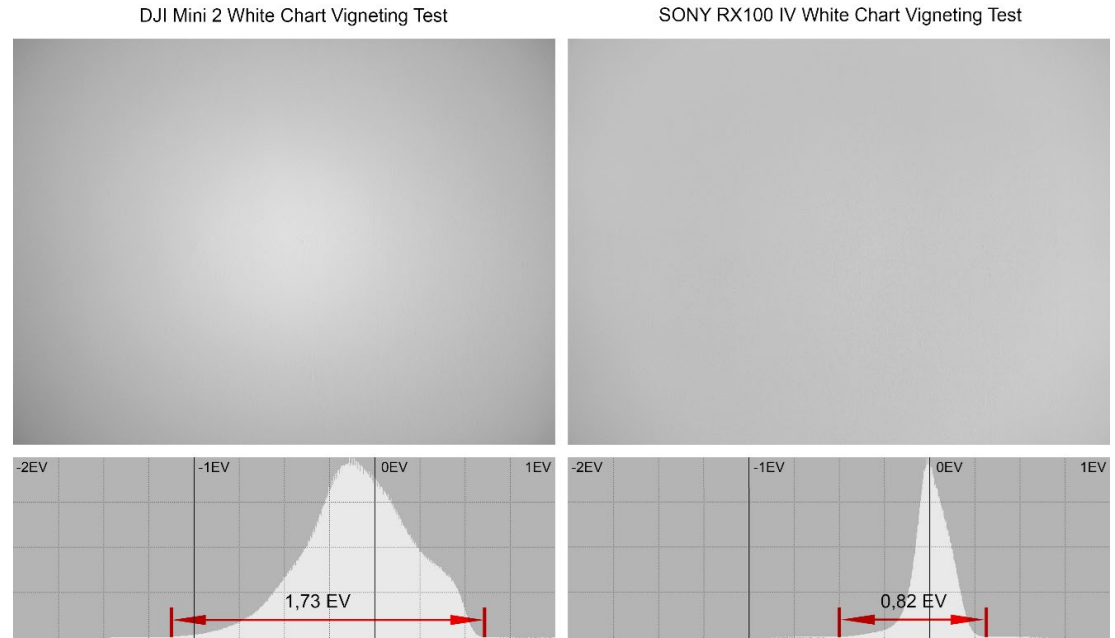


Fig. 10 - Vignetting Test - DJI Mini 2 vs Sony RX100 IV.

laser scanner, was accomplished in order to compare the results, and to evaluate the accuracy of the photogrammetric survey.

To survey the southeast facade, the drone was placed five meters away. The pictures were taken following a path that guaranteed a 70% vertical overlap and a 50% lateral one. The path of the drone began at ground level in an ascending direction until reaching the crowning of the facade. Then, it moved horizontally and descended afterward. This route continued until the entire facade was covered, thus obtaining a total of 366 photographs.

In order to carry out the detailed survey of one of the capitals, the pictures were taken approximately one meter away from the model, describ-

ing four rings around it. Each one of the rings had different camera angles and height to cover all the areas from at least two different viewpoints (Fig. 11). A total of 112 photographs were taken. Both surveys were processed successfully with Agisoft Metashape Professional and no further editing was required (Fig. 12).

To evaluate the level of detail achieved in the resulting images, the GSD (Ground Sample Distance) parameter can be used. GSD defines the spatial resolution of the image, that is, the length represented by each pixel. Given the distances from the model at which the photographs were taken and knowing the characteristics of the sensor and the focal length of the DJI camera, the GSD can be established as follows:

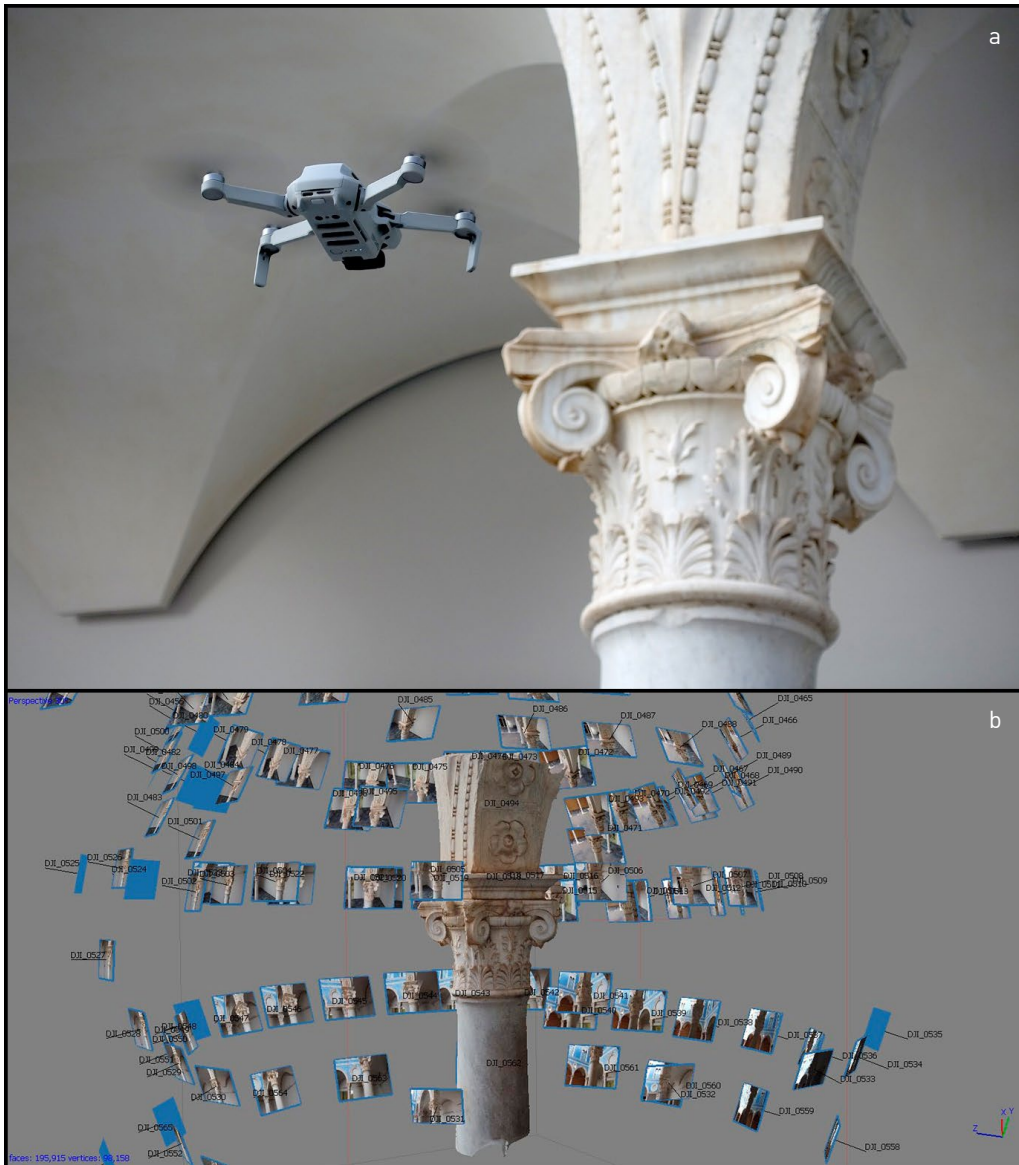


Fig. 11 - Drone DJI Mini2 in flight (a) and camera positions around the capital (b).

- Sw (sensor width) = 6.2 mm
- Sh (sensor height) = 4.6 mm
- Fr (lens focal length) = 4mm
(24mm equivalent focal length)
- imW (image width) = 4000 pixels

For a distance of 5 meters:

- $GSD = (Sw \times H \times 1000) / (Fr \times imW) =$
 $= (6.2 \times 5 \times 1000) / (4 \times 4000) = 1.938mm$

For a distance of 1 meter:

- $GSD = (Sw \times H \times 1000) / (Fr \times imW) =$
 $= (6.2 \times 1 \times 1000) / (4 \times 4000) = 0.3875mm$

In this way, an orthophoto of the southeast façade of the cloister was obtained with a GSD below 2 mm/pixel. The resulting image has an excellent definition and detail and that allows to document the element properly. In order to check the metric precision, the point cloud of this model was exported and compared with the point cloud obtained by a Leica RTC360 scanner. It is a high-speed 3D laser scanner with an integrated HDR spherical imaging system and a visual inertial system (VIS) for real-time recording. Four scanning stations were used (one in each corner) to properly obtain the complete survey of the courtyard. Leica Cyclone Register 360 software was used to acquire the point clouds.

In Figure 13, the orthophoto of the southeast elevation obtained by the laser scanner is compared to the orthophoto from the photogrammetric survey. It can be seen that, despite using a state-of-the-art scanner, the orthophoto obtained by means photogrammetry provides a better texture and detail. Moreover, both point clouds have been analysed with the software CloudCompare as it can be seen in Figure 14. From this comparison it can be determined that the accuracy of the model is within the usual parameters of SfM photogrammetry (Rodríguez-Navarro, 2012). It can be noticed how blue tones predominate in the majority of the façade, which indicates a deviation below a millimetre. There are minor greenish tones in some critical areas, such as mouldings and in some plane's intersections, representing a deviation of less than 1 centimetre. Finally, some punctual red

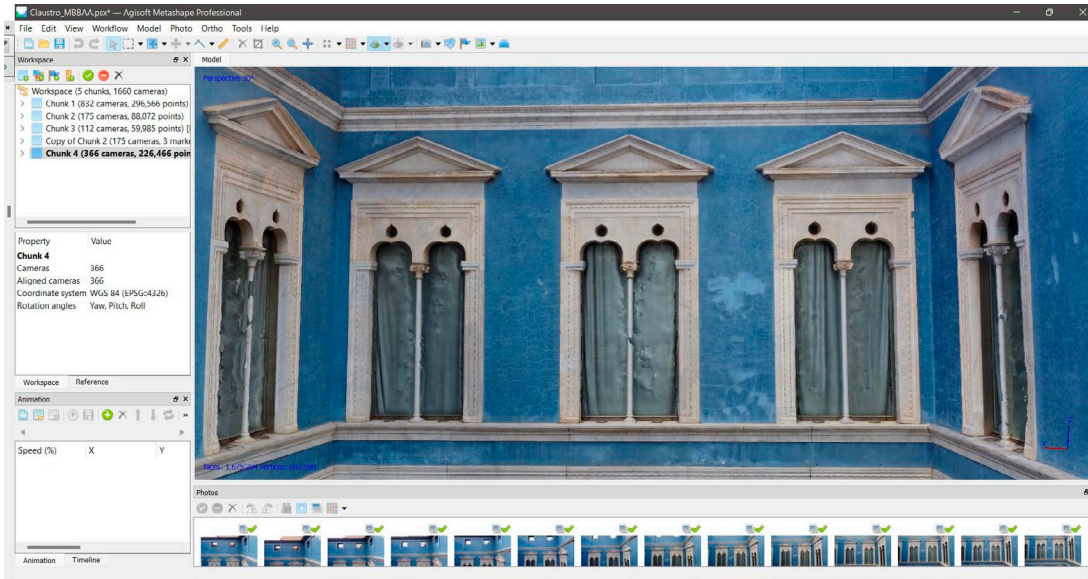


Fig. 12 - Photogrammetric reconstruction of the courtyard with Agisoft Metashape.

Fig. 13 - Resulting orthophoto images obtained from the laser and the photogrammetric survey.

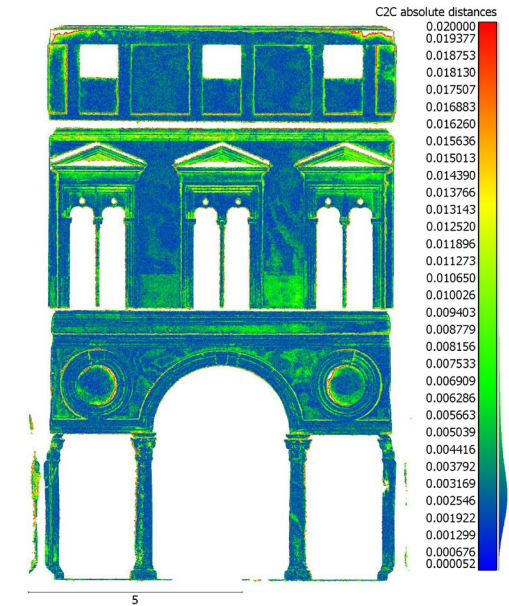
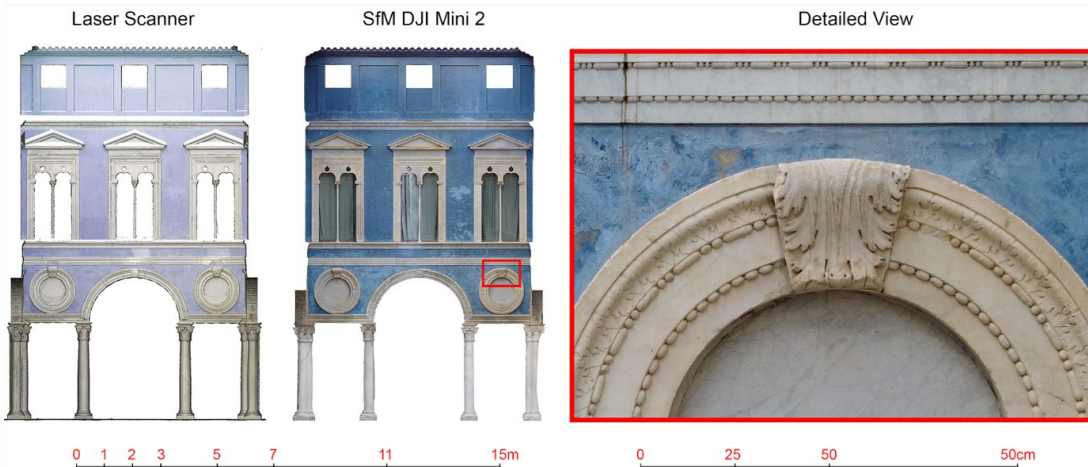


Fig. 14 - Point cloud comparison between the laser and the photogrammetric survey.

fillets are observed, indicating a deviation of up to 2 centimetres. Nevertheless, it should be mentioned that they are found in the shadows and darker areas, which are the most critical in an SfM survey. For all these reasons, it can be assumed that the model obtained by means SfM photogrammetry meets the requirements of a precision architectural survey. With regard to the survey of the capital (Fig. 15), it is evident that a very high resolution was obtained, which is even higher than the necessary one since the resulting GSD is 0.3875 mm/pixel. This is due to the fact that the distance at which the pictures were taken (approximately 1 meter) does not respond to the resolution needs, but rather to the requirements of the flight, so standing further it would have been impossible to fly safely, as the drone would have been very close to other elements. This short distance also facilitates the full display of the element and the absence of hidden areas among the sculpted elements.

CONCLUSIONS

After testing this superlight drone equipped with a mini camera, there arises many virtues such as its low economic cost, its ease of control and the lesser legal requirement for its handling compared to the heavier categories. It should also be borne in mind that its tiny size makes it easy to transport and its great autonomy allows capturing hundreds or even thousands of photographic shots in one session. The difficulty of flying indoors with heavier drones and the risk that this entails can also be minimized with this kind of drones. The results obtained with the DJI Mini 2 are surprising, mainly due to the quality of the small

camera and its sensor. By shooting at appropriate distances in relation to the resolution of its sensor, the achieved quality is comparable to that of any heavier drone, equipped with a superior camera.

Some weaknesses cannot be denied either. First of all, its lightness becomes a problem in the presence of wind. Although its positioning system is first class, a gust of wind or a thermal force can move it abruptly. Another drawback can arise in surveys over 20 meters away from the target, since its small 12Mp sensor would acquire less detail than other drones equipped with better resolution cameras and therefore it would result in a higher SGD.

It can be concluded from this work that these lightweight drones can be considered as an option for precision architectural surveying. Although logically not all the models that have been compared in the first part of the article have been tested, the DJI Mini 2 has the lowest resolution of all of them, so when using superior models such as the DJI Mini 3 or the Autel Evo Nano+, even better results should be expected.

Fig. 15 - Resulting 3D model of the capital obtained from the photogrammetric survey.



FUNDING

This contribution is part of the R+D+i project / Grant PID2020-119469RB-I00, funded by the Ministry of Science and Innovation/ State Research Agency/ 10.13039/501100011033.

NOTE

[1] COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2019/947 of 24 May 2019, on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft

[2] <https://sede.seguridadaera.gob.es/sede-aea/catalogo-de-procedimientos/registro-de-operadores-de-uas>

[3] <https://sede.seguridadaera.gob.es/sede-aea/catalogo-de-procedimientos/curso-de-formacion-y-examen-de-piloto-distancia-en-categoria-ada-abierta>

[4] ENAIRE website can be used in the case of Spain <https://drones.enaire.es>

[5] <https://www.seguridadaera.gob.es/es/ambitos/drones/operaciones-con-uas-drones/drones>

[6] With future firmware updates it would be possible to use Raw format

[7] FCC in an open environment without interferences

[8] Target price in Spain

[9] This link shows the analysis carried out by the prestigious website :DPREVIEW <https://www.dpreview.com/reviews/sony-cyber-shot-dsc-rx100-iv>

[10] RawTherapee is a free and open-source software with GPL license <https://www.rawtherapee.com/>

REFERENCES

Adami, A., Fregonese, L., Gallo, M., Helder, J., Pepe, M., & Treccani, D. (2019). Ultra light UAV systems for the metrical documentation of cultural heritage: Applications for architecture and archaeology. In *6th International Workshop LowCost 3D-Sensors, Algorithms, Applications*, (vol. 42, pp. 15-21). *Strasbourg: Grussenmeyer*.

Bakirman, T., Bayram, B., Akpınar, B., Karabulut, M. F., Bayrak, O. C., Yigitoglu, A., & Seker, D. Z. (2020). Implementation of ultra-light UAV systems for cultural heritage documentation. *Journal of Cultural Heritage*, 44, 174-184.

Carnevali, L., Ippoliti, E., Lanfranchi, F., Menconero, S., Russo, M., & Russo, V. (2018). Close-range mini-UAVs photogrammetry for architecture survey. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 2.

Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft. Official Journal of the European Union L152/45 of 11 June 2019. http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2019/947/oj

Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems. Official Journal of the European Union L152/1 of 11 June 2019. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2019/945/oj

IMATEST. (2004). *Distortion: methods and modules*. <https://www.imatest.com/docs/distortion-methods-and-modules>

Luijk, G. (2007). Histogrammar. <http://www.guillermoluijk.com/software/histogrammar/index.htm>

Rodríguez-Navarro, P. (2012). La fotogrametría digital automatizada frente a los sistemas basados en sensores 3D activos. *EGA. Revista de expresión gráfica arquitectónica*, 17(20), 100-111.

Standard Mobile Imaging Architecture. (2004). *Introduction to vision, mission, values*. <https://smia-forum.org/about/whatis.html>

Uso de drones menores de 250g para documentar el patrimonio arquitectónico

INTRODUCCIÓN

La fotogrametría multi-imagen (SfM/IM) es una herramienta, que junto al laser scanner, son las más utilizadas hoy en día para acometer los trabajos de levantamiento y documentación del patrimonio arquitectónico. La aparición de los drones en los últimos años ha constituido un revulsivo en el campo de la fotogrametría por las ventajas que su uso supone frente a técnicas mucho más costosas como la fotografía aérea tradicional. Además, se abre un nuevo abanico de posibilidades para la fotografía aérea a baja altura, permitiendo tomas muy controladas gracias a la enorme maniobrabilidad de estos aparatos y su posibilidad de permanecer estáticos en el aire. Otros muchos investigadores como Bakirman et al. 2020, Adami et al. 2019 o Carnevali et al. 2018 han sabido ver también las ventajas de este tipo de drones en la documentación del patrimonio arquitectónico.

La libertad inicial en el uso de los drones por el vacío normativo se convirtió en una barrera legal difícil de superar con la actual normativa, que hace que volar un dron requiera darse de alta como operador registrado, obtener permisos especiales de pilotaje y contratar seguros de responsabilidad civil. Sin embargo, los recientes cambios en la normativa europea [1] hacen que ésta sea menos rígida cuando se trata de drones de menos de 250 gramos. Por ello, el objetivo principal de esta contribución es analizar cuáles son los límites legales al vuelo de esta categoría de aeronaves y determinar qué resultados podemos obtener en su aplicación al levantamiento gráfico. Además, se ha realizado un análisis comparativo de los drones menores de 250g disponibles actualmente en el mercado, analizando sus principales características y prestaciones.

Para probar la adecuación de este tipo de aparatos a la práctica de la fotogrametría, se ha efectuado el levantamiento de un caso real, concretamen-

te del Patio del Embajador Vich, uno de los espacios más relevantes de la ciudad de Valencia, integrado actualmente dentro del Museo de Bellas Artes de Valencia. El edificio constituye un inmejorable banco de pruebas por la complejidad de sus formas escultóricas y su combinación con los grandes paños de estuco. El levantamiento fotogramétrico se ha llevado a cabo con un dron DJI Mini 2 de menos de 250 gr. Paralelamente, se ha realizado un levantamiento con un scanner laser para poder confrontar la precisión del levantamiento fotogramétrico. Las conclusiones de este estudio revelarán la conveniencia del uso de este tipo de drones en los trabajos de levantamiento del patrimonio arquitectónico.

ASPECTOS LEGALES DEL VUELO CON DRONES DE MENOS DE 250G

La normativa de aplicación para el vuelo de drones depende del país en el que se realice la operación.

Actualmente en la Unión Europea, de forma general, se deben cumplir las regulaciones (EU) 2019/947 y (EU) 2019/945, además de la normativa específica que establezca cada estado miembro. Por ejemplo, en el caso de España, la Agencia Estatal de Seguridad Aérea española (AESA) requiere que todos los usuarios que pretendan volar un dron con cámara fotográfica, independientemente de su peso, deberán registrarse como operadores y obtener el número de operador que debe incluirse en el dron de forma visible. Este registro es sencillo y gratuito y se realiza de forma telemática en la sede electrónica de AESA [2].

En cuanto al espacio aéreo, la regulación (EU) 2019/947 define tres tipos de operaciones: la abierta, la específica y la certificada. La categoría abierta (categoría A), clasificada como de bajo riesgo, no requiere autorización ni declaración previa y se subdivide en tres subcategorías o escenarios; A1, A2, y A3, con regulaciones específicas. Los drones menores de 250g deberán tener el marcado CE (C0) y podrán operar en las subcategorías A1 y A3, siendo la A1 la menos restrictiva. En la categoría A1 existen limitaciones como mantener el dron dentro del alcance visual, no sobrepasar los 120 metros de altitud sobre la superficie de vuelo y no volar sobre concentraciones de personas, debiendo dejar además una distancia de seguridad. Se debe tener en cuenta que para volar cualquier dron es necesario superar un examen de piloto que depende del ámbito de la operación. En el caso de drones menores de 250g es necesario superar un examen de subcategoría A1/A3 muy sencillo en el que debe probarse que el piloto está familiarizado con el manual del dron suministrado por el fabricante. La formación y el examen son gratuitos y pueden realizarse online [3].

Cabe destacar que en categoría abierta también está limitado el espacio aéreo en los que se pueden realizar vuelos y existen varias aplicaciones y webs que indican tales restricciones [4]. Además de ello, de acuerdo con los artículos 11 y 127 de la Ley de Navegación Aérea, se debe contratar una póliza de seguro que cubra la responsabilidad civil obligatoria frente a terceros por daños que puedan surgir durante y por causa de la ejecución de cada

vuelo que se realice (tanto con fines recreativos como profesionales). Sin embargo, el borrador del Proyecto de Real Decreto de UAS (Unmanned Aircraft Systems) actualmente en tramitación, eximirá del requisito de seguro obligatorio a los UAS de clase C0 y a aquellos sin marcado de clase con masa máxima al despegue inferior a 250g operados en subcategoría A1.

Por último, hay que insistir que lo recogido en este capítulo tiene como objetivo único acercar al lector a la obligación de cumplir con la normativa legal y dejar patente que, aunque los requerimientos legales son menores con esta clase de drones ligeros, esto no significa que no existan y que podamos volar libremente, sino que se debe consultar y cumplir la normativa establecida por cada país [5].

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DRONES ACTUALES LIGEROS

En este apartado se realiza una selección y análisis de drones, menores de 250g, que pueden resultar adecuados para el levantamiento fotogramétrico. Dado que este tipo de aeronaves está enfocado principalmente a un uso recreativo, se puede encontrar en el mercado muchos más modelos de drones ligeros muy económicos, pero han sido descartados por no disponer de una cámara con una resolución y estabilización de imagen mínima para su uso con la fotogrametría.

Tras hacer un análisis de las características de los drones disponibles actualmente en el mercado, se han seleccionado un total de 8 drones que pueden resultar interesantes. La mayoría de los modelos pertenecen a marcas especializadas en la construcción de drones, como DJI y Autel, pero se han tomado en consideración otras marcas, como Hubsan y Xiaomi, que ofrecen aparatos más económicos que resultan también interesantes, tal como veremos a continuación.

DJI MINI 2

Este modelo (Fig. 1) ha sido un superventas por estar respaldado por la calidad que ofrece DJI, uno de los principales fabricantes de drones. La serie Mini empezó a fabricarse en 2019 con la aparición

del Mavic Mini, teniendo el objetivo de crear un dron menor de 250g capaz de producir imágenes y vídeos de alta calidad. El Mini 2 sustituyó al modelo inicial, que se encuentra ya descatalogado, e introdujo mejoras en la calidad de video y sobre todo en lo que a la seguridad del vuelo se refiere.

Las prestaciones de este dron son bastante buenas, cuenta con una cámara con un sensor de 12 Mp con un tamaño de 1/2.3". La distancia focal y la apertura de diafragma en las cámaras de este tipo de drones son siempre fijas. La cámara del Mini 2 tiene una distancia focal equivalente de 24mm con una apertura de diafragma de f2.8 y el enfoque también es fijo. El gimbal de tres ejes proporciona una estabilización perfecta y cuenta con detector inferior de colisiones, pero carece de sensores frontales y traseros. La autonomía de vuelo es de 30 minutos (vuelo a 4.7 m/s y sin viento).

Aunque este modelo sigue disponible en el mercado, DJI ha sacado recientemente un nuevo modelo, el Mini 3, que cuenta con algunas mejoras, tal como veremos a continuación.

DJI MINI 3 PRO

Uno de los avances más notables de este dron (Fig. 2) con respecto a su sucesor es la incorporación de una nueva cámara que dispone de un sensor más grande (1/1.3") y de mayor resolución (48 Mp). La cámara mantiene la longitud focal de 24mm, aunque es más luminosa (f1.7) y dispone de autofocus. El dron también incluye mejoras en la detección de obstáculos con la incorporación de sensores frontales y traseros que ofrecen un plus notable en seguridad de vuelo. En cuanto a la duración de la batería, la autonomía se expande ligeramente a 34 minutos. Opcionalmente, se puede comprar un controlador con pantalla propia, si no se quiere utilizar un smartphone.

Otro apartado en el que ha mejorado este aparato con respecto a su predecesor es la ampliación del rango de inclinación controlable del gimbal y del modo de captura en vertical, característica que lo hace único entre todos los modelos analizados. Con relación a la cámara es interesante mencionar que la marca ha optado por incorporar un sensor con filtro tipo *Quad Bayer* (Fig. 4), seguramente

como una solución de compromiso para aumentar la resolución e intentar minimizar el ruido, sobre todo en la grabación en video.

El ruido en una imagen depende mucho de la relación SNR (*Signal to Noise Ratio*), cuanto mayor es este valor, menos ruido visible aparece en la imagen. En este sentido, conviene que las celdas del sensor sean lo más grande posible para capturar más fotones, minimizando así las diferencias de señal captadas entre las celdas y disminuyendo por tanto el ruido en la imagen. En el Mini 3 se ha cuadruplicado la resolución con respecto al Mini 2 y, a pesar de que el sensor es más grande, el tamaño de la celda decrece. Esta circunstancia hará que también disminuya la relación SNR. Sin embargo, al disponer un filtro *Quad Bayer*, el ruido se mantendrá en un buen nivel trabajando con resoluciones más bajas, como en el caso del video 4K y las fotos fijas a 12Mp. En estos casos se aplica la técnica denominada como *pixel binning* en la que la información para cada píxel se obtiene a partir del conteo de fotones proporcionado por un área de 4 celdas del sensor mejorándose así notablemente la relación SNR. Esta misma técnica de *pixel binning* se ha implantado en todos los drones analizados de más de 12Mp como veremos más adelante. Por otro lado, el modo de captura con resolución máxima (48Mp) puede resultar útil para conseguir más detalle en circunstancias de luz diurna, pero sin duda adolecerá de un mayor nivel de ruido en condiciones de baja luminosidad.

AUTEL EVO NANO Y EVO NANO +

Autel es otra marca importante dedicada a la fabricación de drones y cuenta con dos modelos (Fig. 3) que comparten el mismo diseño y prestaciones de vuelo, pero con cámaras diferentes. La versión Nano + ofrece una cámara y sensor de mayores prestaciones (50Mp y 1/1.28"). No obstante, las características de la cámara de la versión Nano también son notables (48Mp y 1/2"). La cámara del Nano + es más luminosa f1.9 y tiene enfoque automático, mientras que en el modelo Nano la apertura es menor f2.8 y tiene enfoque fijo. Las prestaciones de la serie Nano son muy parecidas a lo que ofrece el DJI mini 3, pero la caracte-

terística diferenciadora es su novedoso sensor que cuenta con un filtro con patrón RYYB. A diferencia del clásico patrón Bayer (RGGB), este nuevo filtro sustituye el verde por el amarillo que queja pasar más la luz (40% más según el fabricante). El resultado es una disminución del ruido en condiciones de baja luminosidad, pero necesita de un algoritmo más complejo para la interpolación de los datos (*demosaiicing*) y la precisión en la reproducción del color dependerá en gran medida de este proceso. Al igual que en el sensor del DJI Mini 3, cada tesela del filtro de la serie nano cubre cuatro celdas para realizar el *pixel binning* (Fig. 4). Por lo que respecta a la autonomía de vuelo, esta es algo menor que en los modelos precedentes con un tiempo estimado de 28 minutos. También la maniobrabilidad controlable del gimbal resulta algo inferior a la del DJI Mini 3.

HUBSAN ZINO MINI, ZINO MINI SE Y ZINO MINI PRO

Hubsan no es una marca de drones tan reconocida como DJI o Autel, pero ofrece un producto de similares prestaciones por un precio más económico. Hubsan tiene tres modelos que configuran la serie Zino (Fig. 5). Todos ellos comparten el mismo diseño y apariencia, pero se diferencian en aspectos como la usencia de los sensores de obstáculos, en los modelos Mini y Mini SE, y la cámara de prestaciones inferiores en el modelo SE (12Mp frente a 48Mp).

La gama Zino tiene buenas especificaciones y destaca del resto por su mayor autonomía de vuelo (45 minutos en las versiones Mini y Mini SE y 40 minutos en la versión Mini Pro). Sin embargo, parece que el fabricante lo considera un dron orientado más a la grabación en vídeo que a la fotografía, ya que no especifica ni la resolución en píxeles ni la relación de aspecto en las tomas estáticas. Ciertas funciones de captura se están perfeccionando mediante actualizaciones de software, que se espera harán posible la captura en formato Raw, que de momento no está convenientemente implementada.

XIAOMI FIMI X8 MINI PRO

La marca china Xiaomi ha iniciado su andadura en la fabricación de drones gracias a su asocia-

ción con empresa Fimi, lanzando al mercado este modelo ligero que tiene interesantes prestaciones para ser una alternativa al resto de modelos analizados y que resulta bastante económico.

La cámara y prestaciones de este dron (Fig. 6) son muy parecidas a las que ofrece el DJI Mini 2. Tiene un cámara con una longitud focal de 26mm con sensor Sony de 12MP y 1/2.6". Carece de sensores anticolidión, aunque utiliza la cámara inferior para detectar la base de aterrizaje. Es el más económico de los analizados, pero hay que tener en cuenta de comprarlo con la batería Pro, pues la estándar es más pesada y hace que la aeronave supere los 250g y no pueda ser utilizada bajo las condiciones legales de esta categoría.

La Tabla 1 muestra una comparación con las principales características de cada uno de los drones seleccionados.

Como puede verse, las prestaciones los distintos modelos son bastante similares y las mayores diferencias se encuentran en la resolución de la cámara. Hay que tener en cuenta que la resolución máxima no tiene por qué ser un factor decisivo en cámaras de esta categoría en la que los sensores son bastante pequeños, puesto que hay que valorar la relación SNR. De hecho, los fabricantes aplican la técnica del *pixel binning* apostando en realidad por la captura óptima a 12 Mp y ofrecen los 48 Mp para poder obtener más detalles en tomas fijas en condiciones de abundante luz y siendo conocedores del tirón comercial que una mayor resolución tiene en los compradores.

Otro parámetro que resulta ventajoso, en general, es tener una apertura de diafragma grande para captar más luz. Sin embargo, en este tipo de cámaras tan pequeñas el diafragma es fijo por lo que no se puede cerrar como en las cámaras convencionales y los fabricantes tratan de maximizar la apertura para capturar más luz y minimizar el ruido en condiciones de baja luminosidad. Sin embargo, en fotogrametría se precisa que las imágenes tengan una buena profundidad de campo para tener mayor nitidez global. Dado que un diafragma más cerrado proporciona una mayor profundidad de campo, sería bueno poder disponer de un dron cuya apertura fuera variable al menos en dos

posiciones, pero de momento ningún fabricante ofrece esta posibilidad en esta categoría.

En los análisis y trabajos de restitución que se han llevado a cabo en este estudio se ha optado por utilizar un Dron DJI Mini 2, modelo con la menor resolución de los drones analizados para testear si la calidad óptica de este tipo de drones resulta suficiente para acometer trabajos de fotogrametría. En primer lugar, se ha realizado un análisis de la calidad óptica de la lente para comprobar aberraciones ópticas como las distorsiones radiales y comparar la nitidez alcanzada en comparación con otras cámaras compactas de calidad, tal como se muestra en el siguiente apartado.

ANÁLISIS DE LA CALIDAD ÓPTICA DEL DJI MINI 2

Para testear la calidad de la óptica de este aparato se han efectuado varias pruebas en las que se compara con una cámara compacta de calidad óptica reconocida como la Sony RX100 IV [9], que pese a disponer de un objetivo de distancia focal variable, se ha ajustado durante las pruebas a la misma distancia focal y diafragma que el dron (24mm y f2.8). El sensor de la cámara Sony tiene algo más de resolución que el del dron 17Mp (formato 4:3) frente a los 12Mp proporcionados por el DJI Mini 2.

La primera prueba sirve para evaluar la distorsión radial de la lente y se ha llevado a cabo fotografiando un blanco de calibración con forma de retícula. La distorsión radial se ha evaluado según el estándar SMIA (Standard Mobile Imaging Architecture [SMIA], 2004). Este estándar se utiliza también en las aplicaciones de análisis de la calidad de imagen desarrolladas por IMATEST (2004). La metodología consiste en encuadrar una retícula, o simplemente un rectángulo, de la misma proporción de la imagen y evaluar porcentualmente las diferencias entre la altura de la cuadrícula en los extremos con respecto a la altura en su centro. Los valores de la distorsión son positivos cuando se trata de distorsión de cojín y negativos en el caso de la distorsión de barril (Fig. 7).

El resultado de las pruebas efectuadas muestra cómo las imágenes almacenadas en formato JPG

son procesadas eficientemente por el software de la cámara para eliminar totalmente la distorsión radial producida (Fig. 8).

En el caso de almacenar la imagen en formato RAW, resulta que, dependiendo del software de revelado, se obtienen resultados diferentes. Cabría esperar que una imagen RAW mostrara la distorsión real que produce la lente, sin embargo, esto no sucede así al procesar los archivos con Adobe Camera Raw (ACR). El fabricante debe incrustar algunos datos de calibración en el archivo RAW que ACR es capaz de interpretar y aplicar de forma transparente, sin posibilidad de elección por parte del usuario. En el caso del revelado con ACR de la fotografía tomada por la cámara Sony, la corrección resulta idéntica que en el JPG y la imagen queda libre de distorsiones. Sin embargo, en la imagen del dron DJI, los parámetros incrustados en el RAW no deben estar del todo afinados y ACR produce una corrección parcial quedando visible una ligera distorsión de cojín (0,79%).

Para poder apreciar la verdadera distorsión producida por la lente, se ha empleado el software de revelado RawTherapee [10], que no aplica ningún parámetro de corrección de la distorsión radial. De esta manera puede verse la distorsión real de ambas cámaras.

Resulta sorprendente que la óptica del dron DJI muestre una distorsión de barril bastante inferior a la evidenciada en el caso de la cámara Sony (-2.24% frente a -7.08%), lo que denota una deformación bastante contenida para una lente con una distancia focal tan corta.

La siguiente prueba consiste en la captura de una escena real con ambas cámaras, siempre con los mismos parámetros de distancia focal, apertura de diafragma, velocidad de exposición y sensibilidad ISO. La exposición se ha fijado en ambos casos a una velocidad de obturación de 1/80s, apertura de diafragma f2.8 (limitado por el dron) e ISO-100. Se ha disparado en formato RAW para obtener la mayor calidad de imagen posible. Las imágenes RAW se han revelado sin aplicar filtros de enfoque que aumenten la acutancia.

La Figura 9 muestra la comparativa de ambas tomas, incluyendo fragmentos al 100% para valorar

los detalles en la nitidez de la zona central del fotograma y de las zonas perimetrales.

El resultado de la prueba arroja de nuevo resultados gratamente sorprendentes en el nivel de detalle alcanzado por el DJI Mini 2. A pesar de que el sensor de la Sony RX100 posee una mayor resolución (17Mp frente a 12Mp), resulta difícil apreciar a simple vista el mayor detalle alcanzado por la Sony. Por el contrario, sí que empieza a evidenciarse una diferencia notable es en el ruido visible en las sombras, en donde la cámara Sony es claramente superior sobre todo gracias a que dispone de un sensor de 1", bastante más grande que el sensor del DJI de solo 1/2.3", siendo en este caso la relación SNR mayor en el caso de la Sony. De igual forma, al observar minuciosamente, se aprecia que hay ligeras aberraciones cromáticas en forma de halo rojo y cian en las zonas de alto contraste de la imagen tomada por el dron, mientras que en la escena fotografiada con la cámara Sony son prácticamente imperceptibles. No obstante, las aberraciones están muy bien controladas para una cámara de estas características y la anchura de los halos no superan el píxel. Aparte de ello, las aberraciones cromáticas pueden corregirse durante el proceso de revelado RAW.

La última prueba consiste en un análisis para evidenciar el efecto de viñeteado producido por la lente. Para ello se ha fotografiado una carta blanca iluminada uniformemente mediante luz natural. Las tomas se han tomado en formato RAW con idénticos parámetros de exposición. Se ha comprobado que, al igual que ocurre con la distorsión, ACR aplica una corrección automática de viñeteo, según los datos embebidos en el formato RAW por el fabricante. Por este motivo se ha utilizado RawTherapee para revelar los archivos de forma totalmente neutra y sin aplicar ajustes que pudieran desvirtuar el contraste original.

A partir del archivo RAW se ha obtenido un TIF de 16 bits, que ha sido analizado con Histogrammar, un software muy interesante desarrollado por Luijk (2007). Este programa permite visualizar el histograma de una imagen en escala logarítmica por pasos de exposición. Gracias a esta herramienta puede establecerse la diferencia luminosa, medida

en incrementos de EV, entre la zona central de la imagen (más clara) y la zona de las esquinas (oscurecidas por efecto del viñeteado).

Tal como se aprecia en la Figura 10, el viñeteo en la imagen tomada por el dron es bastante más acusado que el producido por la cámara Sony, que en este apartado es excelente. La diferencia de luminosidad en el caso del DJI es de 1,73 EV entre las zonas claras y las más oscuras, mientras que en la Sony la diferencia no llega a un paso. Independientemente, el viñeteo no es exagerado y si se quiere se puede corregir en el momento del revelado. También algunos programas de fotogrametría como Metashape pueden opcionalmente corregir automáticamente este efecto.

Tal como se aprecia en las pruebas realizadas, la calidad óptica del dron DJI Mini 2 es bastante buena en comparación con una cámara compacta de alta gama como la Sony RX100 IV. En el siguiente apartado se pondrá a prueba el DJI Mini 2 en la captura fotogramétrica de un ejemplo emblemático del patrimonio arquitectónico valenciano.

METODOLOGÍA DE CAPTURA Y DE RECONSTRUCCIÓN FOTOGRAMÉTRICA

El escenario escogido es el patio del Embajador Vich, que constituye uno de los primeros ejemplos de arquitectura renacentista en la península ibérica. Fue construido hacia 1525 por Jerónimo Vich, embajador del rey Fernando el católico en Roma. El palacio en el que se encontraba el patio fue demolido en 1859, pero las piezas de mármol que su promotor había traído desde Génova para su construcción quedaron repartidas por varios edificios de la ciudad hasta su reconstrucción en 2007 en su nuevo enclave, dentro del Museo de Bellas Artes de Valencia.

Se han realizado dos tipos de levantamientos, el primero de ellos se ha tomado a media distancia para lograr la restitución de una de las fachadas del patio, mientras que el segundo ha consistido en un levantamiento a corta distancia, de uno de los capiteles originales, para lograr restituir un modelo más detallado. Paralelamente, se ha realizado un levantamiento con un scanner laser Lei-

ca RTC 360, para poder confrontar la precisión del levantamiento fotogramétrico.

Para el levantamiento de la fachada sureste se situó el dron a cinco metros de distancia. Se realizaron tomas siguiendo un recorrido que garantizara el solape vertical del 70% y el lateral del 50%. El trazado se inició a nivel del suelo en sentido ascendente hasta llegar a la coronación de la fachada, donde se desplazaba horizontalmente para luego descender; este recorrido siguió hasta cubrir la totalidad de la fachada, obteniéndose un total de 366 fotografías.

Para el levantamiento detallado de uno de los capiteles las tomas se realizaron aproximadamente a un metro de distancia del modelo, describiendo cuatro anillos a su alrededor, cada uno de ellos con diferentes ángulos de toma y altura para cubrir todas las zonas al menos desde dos posiciones, capturándose de este modo un total de 112 fotografías (Fig. 11).

Ambos levantamientos se procesaron con Agisoft Metashape Professional de manera exitosa y no se necesitó realizar ediciones posteriores (Fig. 12). Para evaluar el nivel de detalle alcanzado en las imágenes resultantes se puede emplear el parámetro GSD (*Ground Sample Distance*), que define la resolución espacial de la imagen, es decir, la longitud que representa cada píxel. Dadas las distancias a la que se tomaron las fotografías con respecto al modelo y conociendo las características del sensor y la distancia focal de la cámara del DJI, se pueden establecer el GSD tal como sigue:

- Sw (anchura del sensor) = 6.2 mm
- Sh (altura del sensor) = 4.6 mm
- Fr (longitud focal del objetivo) = 4 mm
(24 mm equivalente en 36 mm)
- imW (anchura de la imagen) = 4000 píxeles

Para una distancia de 5 metros:

$$\text{GSD} = (\text{Sw} \times \text{H} \times 1000) / (\text{Fr} \times \text{imW}) = (6.2 \times 5 \times 1000) / (4 \times 4000) = 1.938 \text{ mm}$$

Para una distancia de 1 metros:

$$\text{GSD} = (\text{Sw} \times \text{H} \times 1000) / (\text{Fr} \times \text{imW}) = (6.2 \times 1 \times 1000) / (4 \times 4000) = 0.3875 \text{ mm}$$

De este modo, se han obtenido las ortofotografías de la fachada sureste del claustro, con una reso-

lución por debajo de los 2 mm/píxel. La imagen resultante tiene muy buena definición y detalle y permite un excelente análisis del paramento.

Para comprobar la fidelidad formal, es decir, la precisión métrica, se ha exportado la nube de puntos de este modelo para compararla con la nube de puntos obtenida mediante escáner Leica RTC360; se trata de un escáner láser 3D de alta velocidad con sistema integrado de imágenes esféricas HDR y sistema inercial visual (VIS) para el registro en tiempo real. Se realizaron cuatro estaciones de escaneado (una en cada esquina) para obtener con garantías el levantamiento gráfico del claustro. Para el registro de las nubes de puntos en un modelo único se ha utilizado el software Leica Cyclone Register 360. También se puede observar la ortofotografía del corte de la nube de puntos del escáner que define el alzado sureste (Fig. 13). Se puede observar que, a pesar de utilizar un escáner de última generación, la ortofotografía obtenida mediante la fotogrametría proporciona una textura de mayor detalle y sin zonas ciegas.

A continuación, se han analizado las dos nubes con el software CloudCompare como se puede ver en la Figura 14. De la lectura de esta comparación se puede extraer que la adaptación a la forma real del modelo se encuentra dentro de los parámetros habituales de la fotogrametría SfM (Rodríguez-Navarro, 2012). Se observa como en la mayoría del paramento predominan los tonos azules, reflejan una desviación por debajo del milímetro. Los tonos verdosos existentes en zonas más críticas, como molduras e intersecciones entre planos, indican una desviación menor de 1 centímetro. Por último, se observa unos filetes rojos puntuales que señalan una desviación de hasta 2 centímetros, aunque cabe destacar que se encuentran en las sombras arrojadas de los tondos y en las esquinas superiores, siendo estas zonas las más críticas en un levantamiento SfM. Por todo ello se puede afirmar que el modelo obtenido mediante la fotogrametría SfM cumple con las exigencias de un levantamiento arquitectónico de precisión.

En cuanto a la obtención del modelo del capitel (Fig. 15), es evidente que se ha obtenido una resolución superior a la necesaria, pues en

pocas ocasiones podremos amortizar un levantamiento de 0.3875 mm/píxel. Esto es debido a que la distancia a la que se realizaron las tomas (aproximadamente 1 metro) no responde a unas necesidades de resolución, sino de ejecución de dichas tomas; es decir, si ampliáramos dicha distancia, seguramente no se podría realizar el vuelo con seguridad, ya que el dron se aproximaría demasiado a otros elementos. Esta corta distancia también facilita la visualización completa del elemento y la ausencia de espacios ocultos por elementos en primer término.

CONCLUSIONES

Tras poner a prueba a este dron superligero dotado con una minicámara fotográfica, se pueden enumerar entre sus principales virtudes el bajo coste económico, la facilidad para su gobierno y el menor requerimiento legal para su manejo en comparación con las categorías de mayor peso. También hay que tener en cuenta que su diminuto tamaño facilita el transporte y su gran autonomía permite realizar cientos o incluso miles de tomas fotográficas en una sesión. No se debe olvidar también la dificultad de volar en interiores con drones de peso superior y el riesgo que ello conlleva.

Los resultados obtenidos con el DJI Mini 2 son sorprendentes, a lo que ha contribuido sin duda la calidad de la pequeña cámara y su sensor. Al disparar a distancias apropiadas en relación con la resolución de su sensor, la calidad obtenida es comparable a la de cualquier dron más pesado, dotado de una cámara superior.

Tampoco se pueden negar algunas debilidades. En primer lugar, su ligereza se convierte en un problema en presencia de viento. Aunque su sistema de posicionamiento es de primer nivel, una racha de viento o una térmica lo desplazan bruscamente. Otra contrapartida puede surgir en levantamientos a más de 20 metros de distancia, ya que su pequeño sensor de 12 Mp sería capaz de adquirir menor detalle que otros drones equipados con cámaras de mayor resolución y por tanto producirían un SGD más elevado. En este sentido podrían resultar útiles los otros drones que se

han analizados de 48Mp, que pueden superar a este modelo en tomas a mayor distancia.

Se puede concluir de este trabajo que este tipo de drones ligeros pueden tenerse en cuenta como una opción para el levantamiento arquitectónico de precisión. Aunque lógicamente no se han puesto a prueba todos los modelos comparados en la primera parte del artículo, el dron que se ha empleado es el de menor resolución de todos los analizados, por lo que utilizando modelos superiores como el DJI Mini 3 o el Autel Evo Nano+ cabría esperar resultados todavía mejores.

FINANCIACIÓN

Esta contribución es parte del proyecto de I+D+i ref. PID2020-119469RB-I00, financiado por Ministerio de Ciencia e Innovación / Agencia Estatal de Investigación / 10.13039/501100011033.

NOTAS

[1] REGLAMENTO DE EJECUCIÓN DE LA COMISIÓN (EU) 2019/947 del 24 Mayo 2019, sobre las reglas y procedimientos para la utilización de aeronaves no tripuladas

[2] <https://sede.seguridadaerea.gob.es/sede-aesa/catalogo-de-procedimientos/registro-de-operadores-de-uas>

[3] <https://sede.seguridadaerea.gob.es/sede-aesa/catalogo-de-procedimientos/cursos-de-formacion-y-examen-de-piloto-distancia-en-categor%C3%ADa-abierta>

[4] En España se puede utilizar, por ejemplo, la web de ENAIRE <https://drones.enaire.es>

[5] <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones/operaciones-con-uas-drones/drones>

[6] Con futuras actualizaciones será posible almacenar en formato Raw

[7] FCC en entorno abierto y sin interferencias

[8] Precio orientativo en España

[9] Puede verse en este enlace el análisis realizado por la prestigiosa web DPREVIEW: <https://www.dpreview.com/reviews/sony-cybershot-dsc-rx100-iv>

[10] RawTherapee es un software gratuito con licencia GPL <https://www.rawtherapee.com/>