



## FOTOGRAMETRÍA CON CÁMARAS DIGITALES CONVENCIONALES Y SOFTWARE LIBRE

### PHOTOGRAMMETRY USING CONVENTIONAL DIGITAL CAMERAS AND FREE SOFTWARE

*Pedro M. Cabezos Bernal, Juan J. Cisneros Vivó*

El objetivo del artículo es mostrar una metodología de trabajo, basada en software libre, para obtener ortofotos usando cámaras digitales convencionales y poner los métodos fotogramétricos al alcance de cualquier persona interesada en obtener datos métricos precisos a partir de fotografías. También los fotógrafos podrán aplicar la metodología expuesta para corregir de manera eficaz la perspectiva de sus fotografías. Se exponen ciertas consideraciones acerca de las condiciones de la toma fotográfica en lo que respecta a distancia focal, diafragma y enfoque, incluyendo el concepto de distancia hiperfocal. Se analizan las distorsiones ópticas más relevantes y se explican los

fundamentos del proceso de calibración de la cámara y el proceso de rectificación de la imagen, haciendo uso de software libre del que se proporcionan los links de descarga.

El artículo concluye con diversos ejemplos de aplicación de la metodología expuesta y precisiones obtenidas.

**Palabras clave: Fotogrametría; calibración; restitución; corrección perspectiva**

---

*The main purpose of the article is to show a working methodology based on free software to obtain orthophotos with conventional digital cameras and make photogrammetric methods available to any person interested*

*in obtaining good accuracy metric data from photographs. Architectural photographers will also find a correct way to make perspective corrections to their photographs. Considerations about shooting conditions are explained concerning focal length, aperture, focus and hyperfocal distance concept. Optical aberrations are analyzed, also basics of camera calibration and image correction process using free software are exposed. Software download links are provided.*

*The article concludes with several examples applying the methodology described and showing details about obtained accuracy.*

**Keywords: Photogrammetry; calibration; restitution; perspective correction**



1. Corrección de perspectiva. Pabellón Karlsplatz en Viena, arquitecto: Otto Wagner.

1. Perspective Correction. Karlsplatz Pavilion in Vienna. Architect: Otto Wagner.



1

## Introducción

La fotografía ha sido desde siempre una herramienta fundamental para el arquitecto, empleada principalmente como recordatorio visual en la fase de proyecto y también para documentar el estado del bien arquitectónico.

Una de las aplicaciones más interesantes, pero menos accesible, es la obtención de datos métricos mediante el levantamiento fotogramétrico, donde equiparando las fotografías con perspectivas cónicas y aplicando las leyes reconstitutivas del sistema cónico, obtenemos los datos necesarios para el levantamiento gráfico.

Las imperfecciones del objetivo de una cámara convencional producen distorsiones en la fotografía que la hacen diferente de una perspectiva cónica. Por ello, en fotogrametría, se utilizan objetivos y cámaras de alta precisión, métricas o semimétricas para minimizar las distorsiones. Las reconstituciones se realizan mediante un software específico que generalmente requiere un apoyo topográfico, por lo que la práctica de la fotogrametría queda relegada, por su elevado coste, a empresas o entidades dedicadas a este fin específico.

Este artículo ofrece un método de trabajo alternativo para que cualquier persona, utilizando su cámara digital y programas de libre distribución, consiga hacer reconstituciones fotogramétricas, de modo autónomo, sin pretender hacer competencia a un levantamiento fotogramétrico convencional.

La metodología expuesta no sólo tendrá aplicación con fines reconstitutivos sino que los fotógrafos encontrarán un método eficaz y preciso de corregir la perspectiva.

## Corrección de las distorsiones geométricas

Todos los objetivos fotográficos convencionales producen en mayor o menor medida distorsiones geométricas como son la distorsión radial y la tangencial.

### Distorsión radial

Es un tipo de aberración que origina que las líneas rectas aparezcan como curvas en la fotografía, debido a la desalineación que sufren los rayos al atravesar las distintas lentes. Si las curvas son cóncavas con respecto al centro de la fotografía, la distorsión radial se de-

## Introduction

Photography has always been a basic tool for the architect, principally employed as a visual record during the Project phase and also to visually document the architectural entity.

One of the most interesting but least accessible applications is the obtaining of metric data by way of photogrammetry surveys. By giving the photographs a conic perspective and applying the reconstitutive laws of the conic system, we obtain the necessary data for the graphical survey.

The imperfections of a conventional camera lens produce distortion in a photograph which means it differs from a conic perspective. For this reason, in photogrammetry, high precision lenses and cameras are used; they are metric or semi-metric in order to minimize distortion.

Restoration is carried out using specific software which usually requires some topographic support, for this reason the practice of photogrammetry is limited, because of its high cost, to specialized companies and organizations.

This article presents an alternative method which allows any individual, using a digital camera and free software, to carry out photogrammetric restoration by his own, without assuming to compete with a conventional photogrammetric survey.

The methodology presented here is not only applied to restoration but also to providing photographers with an efficient and precise method for correcting perspective.

2. Distorsión de barril (izquierda) y distorsión de cojín (derecha)

2. Barrel distortion (left) and pincushion distortion (right)



2

3. Corrección de la distorsión radial.

3. Radial distortion correction.

## Correction of geometric distortion

All conventional photographic lenses produce geometric distortion, such as radial and tangential distortion, to a greater or lesser degree.

### Radial distortion

This is a type of aberration which makes straight lines appear curved in a photograph, due to the misalignment which the rays suffer as they pass through different lenses. If the curves are concave with respect to the centre of the photograph, the radial distortion is given the name of barrel distortion, while if they are convex, it is called pincushion distortion.

There are two different mathematical models for correcting this type of distortion, but the one we will use follows the equation 1:  $r_0 = (a \cdot r_c^3 + b \cdot r_c^2 + c \cdot r_c + d) \cdot r_c$ , where  $r_0$  is the initial distance between any point  $P$  and the centre of distortion  $O$  (vector  $\vec{OP}$ ) and  $r_c$  the distance between the corrected point  $P'$  and the centre of distortion  $O$  (vector  $\vec{OP}'$ ).

The  $\vec{OP}'$  and  $\vec{OP}$  vectors coincide as regards direction, thus corrected point  $P'$  only moves closer or nearer to the origin in the same direction as the initial vector. (Fig.3)

The parameters to be determined are the coefficients of the  $a, b, c$  polynomial, while the

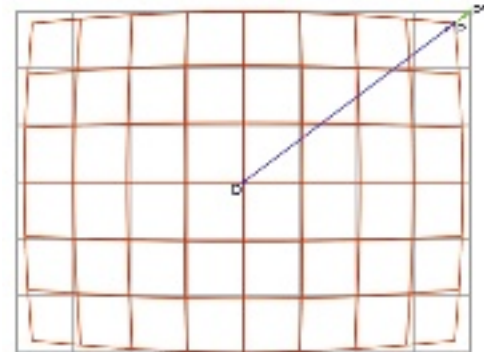
nomina distorsión de barril, mientras que si son convexas, se llama distorsión de cojín.

Para corregir este tipo de distorsión existen distintos modelos matemáticos, pero el que utilizaremos obedece a la ecuación 1:  $r_0 = (a \cdot r_c^3 + b \cdot r_c^2 + c \cdot r_c + d) \cdot r_c$ , siendo  $r_0$  la distancia inicial entre un punto cualquiera  $P$  y el centro de distorsión  $O$  (vector  $\vec{OP}$ ) y  $r_c$  la distancia entre el punto corregido  $P'$  y el centro de distorsión  $O$  (vector  $\vec{OP}'$ ).

Los vectores  $\vec{OP}'$  y  $\vec{OP}$  coinciden en dirección, por lo que el punto corregido  $P'$  sólo experimenta un acercamiento o alejamiento del origen en la misma dirección del vector inicial. (Fig.3)

Los coeficientes del polinomio  $a, b, c$  son los parámetros a determinar, mientras que el coeficiente  $d$  se calcula según la expresión  $d=1-a-b-c$  para preservar el tamaño original de la imagen.

El centro de distorsión  $O$  rara vez coincide con el centro de la imagen, debido a que los defectos de fabricación producen descentramientos entre el sensor y el eje óptico, que también habrá que determinar.



3

### Distorsión tangencial

Es la debida a las imperfecciones en la construcción y posicionamiento del conjunto de lentes que produce un descentramiento de los centros de curvatura de la lente con respecto al eje óptico. Esta distorsión provoca un descentramiento que tiene componente radial y tangencial, siendo esta última perpendicular al vector de posición del punto en cuestión.

En las lentes modernas, el efecto de la distorsión tangencial es pequeño comparado con el de la distorsión radial, por lo que podemos ignorarlo.





4. Fotografía tomada para el proceso de calibración y líneas que serán introducidas posteriormente.

4. Photograph taken to do calibration process with lines that will be introduced later.

Los parámetros necesarios para corregir las distorsiones geométricas de la imagen se denominan parámetros intrínsecos de la cámara. Para determinarlos realizaremos un procedimiento denominado calibración.

### Calibración de la cámara

Existen diversos métodos y algoritmos de calibración de cámaras, algunos automáticos a partir de fotografías de patrones impresos, pero este artículo apuesta por el software libre y para ello utilizaremos un programa llamado Hugin 2, dedicado al cosido de imágenes para la construcción de panoramas que, indirectamente, permite tanto el calibrado de cámaras como la corrección y rectificación de fotografías.

Los métodos de calibración que proponen fotografiar patrones impresos obligan a realizar un enfoque cercano, que no se corresponde con las condiciones de enfoque en fotografía arquitectónica, por ello el método propuesto parte de la fotografía de un escenario arquitectónico.

### Elección del escenario

El proceso de calibración requerirá la introducción manual de puntos pertenecientes a rectas del modelo, lo que puede provocar errores suplementarios si la introducción es deficiente. Por otro lado, las desviaciones geométricas del modelo también afectarán a la calidad de la calibración, por lo tanto conviene escoger modelos bien ejecutados, con líneas bien contrastadas y finas para identificar puntos con precisión.

### Distancia Focal y enfoque

El proceso de calibrado se efectúa para una distancia focal concreta. Lo usual en fotografía arquitectónica es utilizar grandes angulares por tanto, si el objetivo es de distancia focal variable (objetivo Zoom), lo fijaremos a la menor distancia focal para obtener el mayor campo visual.

El enfoque varía ligeramente la distancia focal, por lo que es conveniente fijarlo. Si se trata de una cámara compacta, podemos usar el modo paisaje para ajustar el enfoque a infinito.

coefficient is calculated following the equation  $d=1-a-b-c$  in order to preserve the original size of the image.

The centre of distortion  $O$  rarely coincides with the centre of the image, this is because manufacturing defects produce some misalignment of the sensor and the optical axis, which is also to be determined.

### Tangential distortion

This is caused by imperfections in the construction and positioning of the set of lenses which produce misalignment of the centres of curvature of the lens with the optical axis. This distortion produces decentring which has both a radial and tangential component, the latter being perpendicular to the position vector of the point in question.

In modern lenses, the effect of tangential distortion in comparison with radial distortion is small, for this reason we can ignore it.

The parameters necessary for correcting geometric image distortion are called the intrinsic parameters of the camera. In order to determine them we carry out a process called calibration.

### Camera calibration

There are various methods and algorithms in use for the calibration of cameras, some are automatic, using photographs of printed charts, but this article focuses on free software and for this reason we use Hugin 2, which is a programme for stitching and merging photographs in order to construct panoramas and which, indirectly, facilitates both camera calibration and the correction and rectification of photographs. Close focusing is essential for those calibration methods which propose the photographing of printed charts, this does not correspond well with the focus conditions of architectural photography, for this reason, the method proposed here is based on the photographing of an architectural scene.

### Choosing the scene

The calibration process requires manually entering points corresponding to straight lines on the chart, which may be the source of supplementary errors if the entries are deficient. Geometric deviation will also affect calibration quality; therefore it is advisable to choose well executed charts, with fine and well contrasted lines in order to identify the corresponding points with precision.



## Focal Length and focussing

The calibration process is carried out for a fixed focal length. Wide angles are common in architectural photography, therefore, if the lens has a variable focal length (Zoom lens), it is fixed to the lowest possible focal length in order to obtain the widest possible field of vision. Focusing slightly varies the focal length, for this reason it is advisable to keep it fixed. When using a compact camera we can use landscape mode to adjust the focus to infinity. When using a reflex camera, it is best to calibrate the camera to an optimal length of focus called hyperfocal distance, and not to infinity, as in this way we can maximize the depth of field of the scene.

## Hyperfocal Distance

The calculation of hyperfocal distance depends on three variables; Focal length, aperture, and the circle of confusion limit.

The equation 3 for calculating hyperfocal distance is:

$$H = \frac{f^2}{d \cdot c} + f$$

where is  $H$  the Hyperfocal distance in mm,  $f$  is the focal length in mm,  $d$  the aperture number and  $c$  the diameter of the circle of confusion.

If we require depth of field we reduce the aperture diameter, although not too much, as, due to diffraction, an optimal level of sharpness is achieved between  $f 5.6$  y  $f 11$ . Fixing the aperture diameter to  $f 8$  is a good set up for most lenses.

Calculating a suitable circle of confusion diameter is somewhat more complex, for this reason it is important to understand the principles which govern its calculation.

## Calculation of Permissible Circle of Confusion

The circle of confusion is the image which is obtained from a point on the scene, on the sensor or focal plane, whose diameter varies depending on whether the point is more or less in focus. Calculating the permissible circle of confusion means finding the optimum size of the circle of confusion for a point to be perceived as being in focus. This will depend on the size of the sensor, the dimensions of the printed copy and the viewing distance from the copy.

The lens manufacturer Carl Zeiss calculates that the optimal circle of confusion, on the printed

Si disponemos de una cámara réflex, lo ideal es calibrar la cámara a una distancia óptima de enfoque denominada distancia hiperfocal, y no a infinito, puesto que maximizaremos la profundidad de campo de la escena.

## Distancia Hiperfocal

La determinación de la distancia hiperfocal depende de tres variables; la distancia focal, el diafragma, y el círculo de confusión admisible.

La ecuación 3 de la distancia hiperfocal es:

$$H = \frac{f^2}{d \cdot c} + f$$

siendo  $H$  la distancia Hiperfocal en mm,  $f$  la distancia focal en mm,  $d$  el número de diafragma y  $c$  el diámetro de círculo de confusión.

Si queremos profundidad de campo elegiremos un diafragma cerrado, aunque no demasiado ya que, debido a fenómenos de difracción, se consigue un nivel óptimo de detalle entre  $f 5.6$  y  $f 11$ . Fijar el diafragma a  $f 8$  es una buena elección para la mayoría de objetivos.

La determinación del diámetro del círculo de confusión adecuado es algo más complejo, por lo que conviene exponer los principios que rigen su determinación.

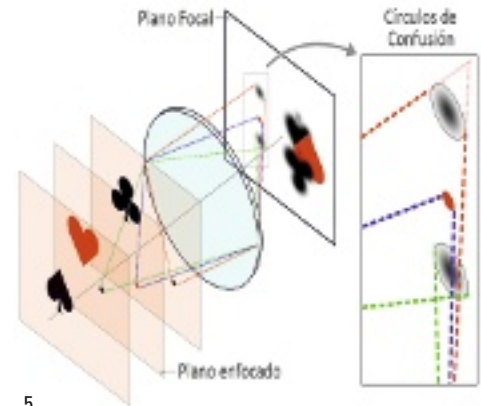
## Determinación del círculo de confusión aceptable

Se denomina círculo de confusión a la imagen que se obtiene de un punto de la escena, sobre el sensor o plano focal, cuyo diámetro varía en función de que el punto esté más o menos enfocado.

La determinación del diámetro del círculo de confusión aceptable consiste en encontrar el tamaño del círculo de confusión óptimo para que un punto se perciba como enfocado, lo que dependerá del tamaño del sensor, las

5. Círculos de confusión sobre el plano focal.

5. Circles of confusion on the focal plane.



5

dimensiones de la copia impresa y la distancia de observación de la copia.

El fabricante de lentes Carl Zeiss considera que el círculo de confusión óptimo, sobre la copia impresa, sería  $d / 1730$ , siendo  $d$  la diagonal de la copia y la distancia de observación igual a la diagonal. Podemos deducir una ecuación que relacione el tamaño del círculo de confusión sobre el sensor y el de la copia impresa, para un tamaño y una distancia de observación determinados según la siguiente expresión:

$$c = \frac{do \cdot ds}{d \cdot 1730}$$

siendo  $c$  el tamaño del círculo de confusión sobre el sensor,  $d$  la diagonal de la copia,  $ds$  la diagonal del sensor y  $do$  la distancia de observación.

Considerando que un sensor tamaño full frame (36x24 mm) tiene una diagonal de  $\sqrt{1872}$ , la expresión anterior se reduce a:

$$c = \frac{do}{d \cdot 40}$$

En sensores de otro tamaño bastará dividir por el factor de multiplicación del sensor, para lo que se ofrece la tabla siguiente:

6. Círculo de confusión para sensores de cámaras réflex actuales.

6. Circle of confusion for current SLR camera sensors.

7. Enfocando a la distancia hiperfocal se maximiza la profundidad de campo.

7. Focusing to the hyperfocal distance will maximize depth of field.

Tamaño del sensor Sensor Size	Factor de multiplicación Crop Factor	Círculo de confusión $c$ (mm) Circle of confusion $c$ (mm)
Full Frame 36x24mm	1	$c = \frac{do}{d \cdot 40}$
APS-C (Nikon, Sony, Pentax)	1.5	$c = \frac{do}{d \cdot 60}$
APS-C (Canon)	1.6	$c = \frac{do}{d \cdot 64}$
4/3 (Olympus)	2	$c = \frac{do}{d \cdot 80}$

6

copy, is  $d/1730$ , where  $d$  is the diagonal measure of the copy and the viewing distance is equal to the diagonal measure. We can formulate an equation which relates the size of the circle of confusion on the sensor and that of the printed copy, for a determined image size and viewing distance in the following way:

$$c = \frac{do \cdot ds}{d \cdot 1730}$$

where  $c$  is the size of the circle of confusion on the sensor,  $d$  is the diagonal measure of the copy,  $ds$  is the diagonal measure of the sensor and  $do$  is the viewing distance.

When we consider that a full frame (36x24 mm) sensor image has a diagonal measure of  $\sqrt{1872}$ , The previous equation may be reduced to:

$$c = \frac{do}{d \cdot 40}$$

For sensors with other sizes it is enough to divide by the multiplication factor of the sensor, for which the following table is provided:

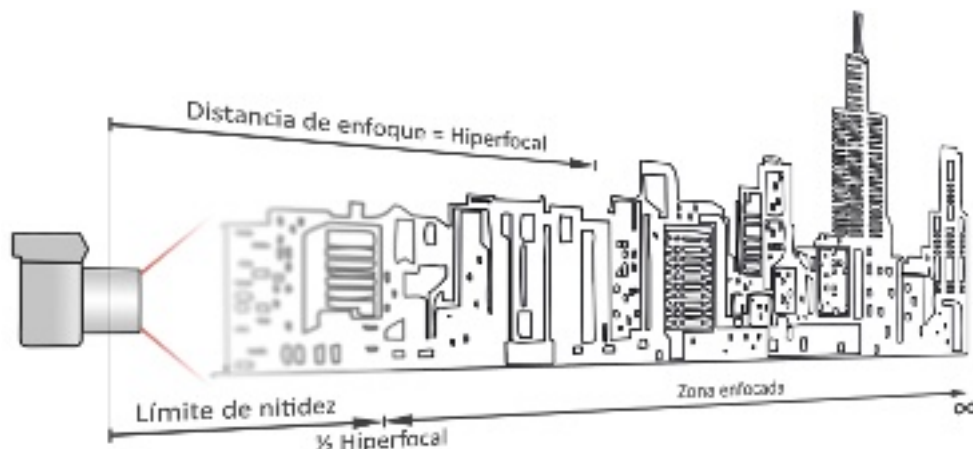
Once the circle of confusion has been calculated, the aperture diameter has been fixed and the focal length of the lens has been determined, we can calculate the hyperfocal distance with which we can maximise the depth of field of the image 4.

When the focus is fixed to the hyperfocal distance, all points further from the camera than half the hyperfocal distance are perceived as being in focus, this distance is called the sharpness limit.

### Calibration process using Hugin

The calibration process includes an initial stage of entering control points corresponding to straight lines which appear in the photograph (fig.4), in order to achieve a set of points for each of the straight lines to be considered. It is imperative to give more importance to the straight lines at the side of the photo than those near the centre, in order to achieve greater distortion, in the same way it is advisable to enter any diagonal lines that pass through or near to the centre of the photograph. Previously, the optimization algorithm uses the position of the points which have been entered and calculates the parameters of the radial distortion, the displacement from the centre of the photogram as regards the centre of distortion and the real focal length.

The first step is to load the image from the "Images" tab using the "Load Individual image"



7

Una vez determinado el círculo de confusión, fijado el diafragma y conocida la distancia focal de objetivo, podremos calcular la distancia hiperfocal con la que maximizar la profundidad de campo de la toma 4.

Al fijar el enfoque a la distancia hiperfocal, todos los puntos que distan de la cámara más de la mitad de la distancia hiperfocal se percibirán enfocados, a esta distancia se le llama límite de nitidez.

### Proceso de calibrado mediante Hugin

El proceso de calibración consta de una etapa inicial en la que se han de introducir puntos pertenecientes a rectas que aparecen en la foto (fig.4), para conseguir un conjunto de puntos para cada una de las rectas consideradas. Es imperativo dar más importancia a las rectas extremas que a las próximas al centro de la fotografía, por tener una mayor distorsión, si bien conviene introducir alguna lí-



## 8. Introducción de puntos pertenecientes a rectas del modelo.

### 8. Creating points from the model.

button, then we preview the transformation by pressing *Ctrl+P* which opens the preview window and from the “Projection” dialogue box we can change the type of projection to “Rectilinear”. We use the “Auto” button and the “fit” button to optimize the field of vision of the previewed photograph and then close the preview window.

The process of entering the points is carried out from the “Control points” tab, where the duplicated image appears. Pairs of points corresponding to each straight line must be entered, indicating a point on the right hand image and another on the left and then pressing the “Add” button.

It is very important to indicate that the pair correspond to a particular straight line, using the “Mode” dialogue box and selecting “New line” for the first pair of points corresponding to a straight line, after which the programme will assign a line number which will be used for the rest of the points corresponding to the same straight line (fig.8).

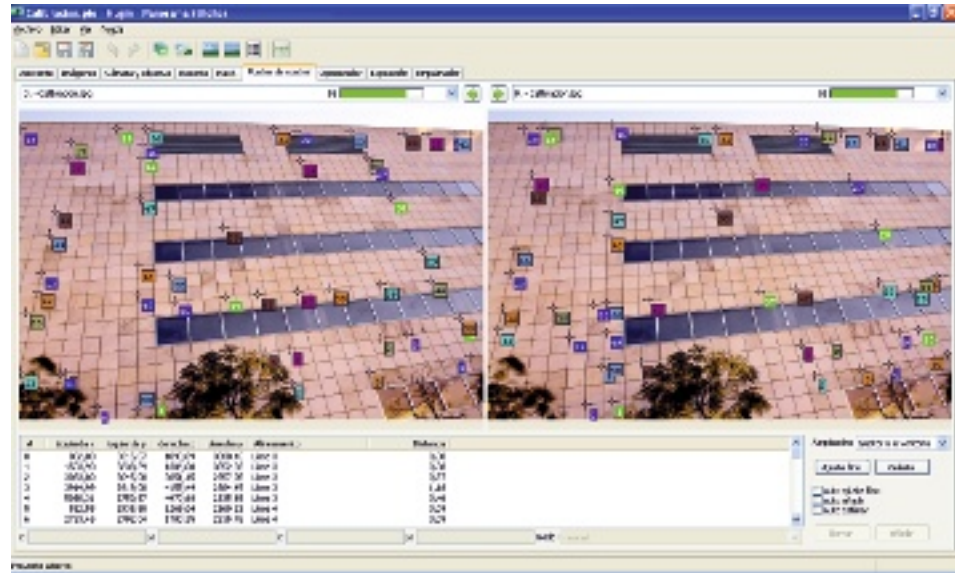
After entering all the control points, optimization is carried out by way of the “Optimizer” tab, and selecting “custom parameters below” from the “Optimize” dialogue box. Then by ticking only the check boxes corresponding to: *distortion (a)*, *barrel (b)*, *distortion (c)*, *x shift (d)* and *y shift (e)*, which make up the parameters of the radial distortion, and will be optimized when the “Optimize now!” button is clicked.

The Project is saved by selecting “File”→“Save” from the menu in order to return to it later to complete the process of calibration as we still need to obtain the real focal length of the lens which will be achieved by way of an analogue process called rectification.

## Rectification of photographs

Rectifying a photograph supposes a projective transformation, with the aim of altering the perspective of the image in order to visualise a plane in true proportion. This transformation can be understood spatially as a cutting of the projective beam by a plane  $\pi$ , parallel to that which is to be restored (Fig.9).

In order to define the projective transformation certain information is required. In traditional photogrammetry information taken from topographic studies based on coordinates of points of the plane to be restored is used. In our case we



8

nea diagonal que pase cerca del centro de la fotografía.

En un proceso posterior el algoritmo de optimización utiliza la posición de los puntos introducidos y calcula los parámetros de la distorsión radial, el desplazamiento del centro del fotograma con respecto al centro de distorsión y la distancia focal real.

El primer paso es cargar la imagen desde la pestaña “Imágenes” mediante el botón “Cargar imagen individual”, después debemos acceder a la vista previa de la transformación pulsando *Ctrl+P* y desde la lista desplegable “Proyección” cambiaremos el tipo de proyección a “Rectilínea”. Pulsaremos el botón “Auto” y el botón “Ajustar” para optimizar el campo visual de la foto previsualizada y cerraremos la ventana de vista previa.

El proceso de introducción de puntos se realiza desde la pestaña “Puntos de control”, donde aparece la imagen duplicada. Debemos introducir parejas de puntos pertenecientes a cada una de las rectas, indicando un punto en la imagen derecha y otro en la izquierda y pulsando después el botón “Añadir”.

Es muy importante indicar que la pareja pertenece a una recta determinada, mediante la lista desplegable “Modo” en la que indicaremos “Línea nueva” para la primera pareja de pun-

tos pertenecientes a una recta, tras lo que el programa asignará una número de línea que utilizaremos para el resto de puntos pertenecientes a la misma recta (fig.8).

Después de introducir todos los puntos se realiza la optimización desde la pestaña “Optimizador”, indicando en la lista desplegable “Optimizar” “los siguientes parámetros personalizados”, a continuación se han de marcar únicamente las casillas de verificación correspondientes a: *distorsión (a)*, *barril (b)*, *distorsión (c)*, *desplazamiento x (d)* y *desplazamiento y (e)*, que constituyen los parámetros de la distorsión radial, que quedarán optimizados tras pulsar el botón “¡Optimizar ahora!”.

Guardaremos el proyecto desde el menú “Archivo”→“Guardar” para volver a él, más adelante y completar el proceso de calibrado, del que nos falta obtener la distancia focal real del objetivo que hallaremos mediante un proceso análogo al de rectificación.

## Rectificación de fotografías

Rectificar una fotografía supone una transformación proyectiva, que tiene como finalidad alterar la perspectiva de la imagen para visualizar un plano en verdadera proporción. Esta transformación se puede entender es-



parcialmente como un corte del haz proyectivo por un plano  $\pi$ , paralelo al que se pretende restituir (Fig.9).

Para definir la transformación proyectiva necesitamos cierta información. En la fotogrametría tradicional se emplea información extraída del apoyo topográfico en base a coordenadas de puntos del plano a restituir. En nuestro caso utilizaremos condiciones geométricas para suplir el apoyo topográfico. Bastará con identificar en la imagen tan solo dos rectas horizontales y dos verticales del plano a restituir, para resolver la matriz de transformación.

Las condiciones geométricas necesarias son fáciles de indicar en el caso de fotografías arquitectónicas, puesto que en la mayoría de casos tendremos referencias como aristas de cornisa y dinteles de huecos que podrán ser consideradas como líneas horizontales, mientras que los límites laterales o las aristas de las jambas de los huecos pueden considerarse como líneas verticales.

### Rectificación mediante Hugin

La primera rectificación que hagamos servirá para completar el proceso de calibración que guardamos anterior-

### 9. Transformación proyectiva para la rectificación.

9. Projective transformation for rectification process.

use geometric conditions to replace the topographic studies. It is sufficient to identify in the image just two horizontal and two vertical straight lines of the plane to be restored, in order to create the transformation matrix.

The necessary geometric conditions are easy to indicate in the case of architectural photography, given that in most cases we will have reference points such as the edges of stone cornices and hollow lintels which may be considered as horizontal lines, while side edges or the corners of the frames of the hollows can be considered as vertical lines.

### Rectification using Hugin

The first rectification to be carried out is to complete the calibration process that we previously saved and which we can recuperate by





clicking "File" → "Open" from the menu. Press *Ctrl+P* and check, in the "Projection" dialogue box, that the projection type is "Rectilinear". Click the "Auto", "Fit" buttons and close the preview window.

The geometric conditions are entered using the "Control Points" tab, a pair of points are added for each straight line, indicating a point on the left hand image and another on the right, after which we click the "Add" button and indicate on the "Mode" dialogue box, whether it is a vertical or horizontal line.

As was previously mentioned, it is sufficient to identify just two horizontal and two vertical straight lines, but if we enter a greater number, any errors will be better compensated for. Another aspect which must be taken into account, is that the greater the separation between the points which define the lines, the more precise the restoration, for this reason it is advisable to identify lines which are as long as possible and to mark two end points (Fig.10).

Optimization is carried out by way of the "Optimizer" tab, and by selecting "custom parameters below" from the "Optimize" dialogue box. Then by ticking only the check boxes corresponding to: *yaw (y)*, *pitch (p)*, *roll (r)* and *view (v)*, which make up the parameters which define the projective transformation and, only in this case (where we are completing the calibration) do we tick the check boxes corresponding to radial distortion which are: *distortion (a)*, *barrel (b)*, *distortion (c)*, *x shift (d)* and *y shift (e)*. We then click the "Optimize now!" button and we can see in the preview window (*CTRL+P*) a preview of the orthophoto which has been created.

In order to obtain the definitive rectified image open the "Stitcher" tab and click the "Calculate optimal size" button, so that the resampling will be optimal with regard to the resolution of the original image. The file format of the image is selected from the "Format" list and finally the "Stitch!" button is clicked to generate and save the output image.

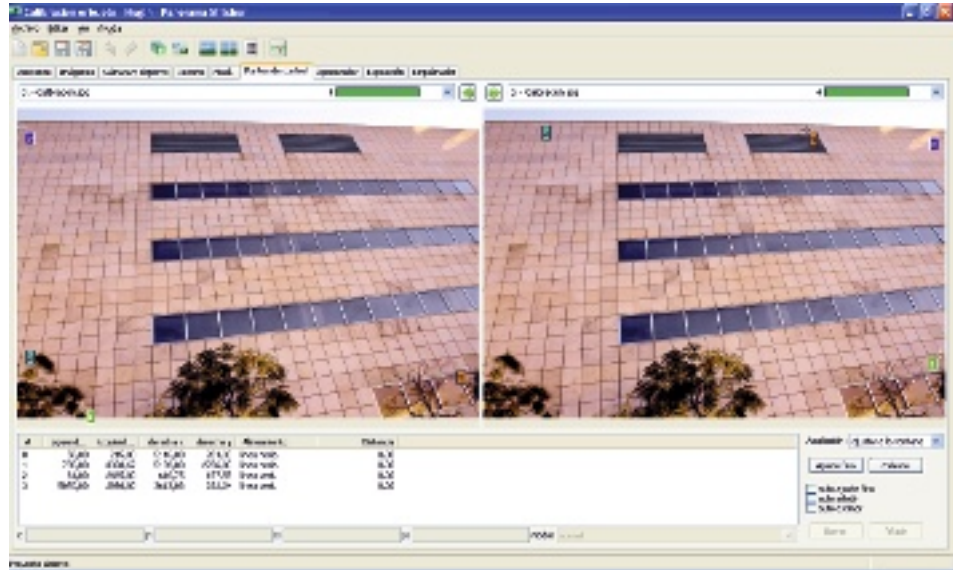
The calibration parameters can be stored for use with any other photographs taken with the same camera, lens and focal length, in the "Camera and lens" tab, by clicking the "Save lens" button and can be returned to and used later by clicking "Load lens". The difference being that during the optimization process it will be sufficient to tick the "Positions and view (*v,i,d,v*)" option from the "Optimize", dialogue box.

10. Introducción de puntos pertenecientes a dos rectas verticales y dos horizontales.

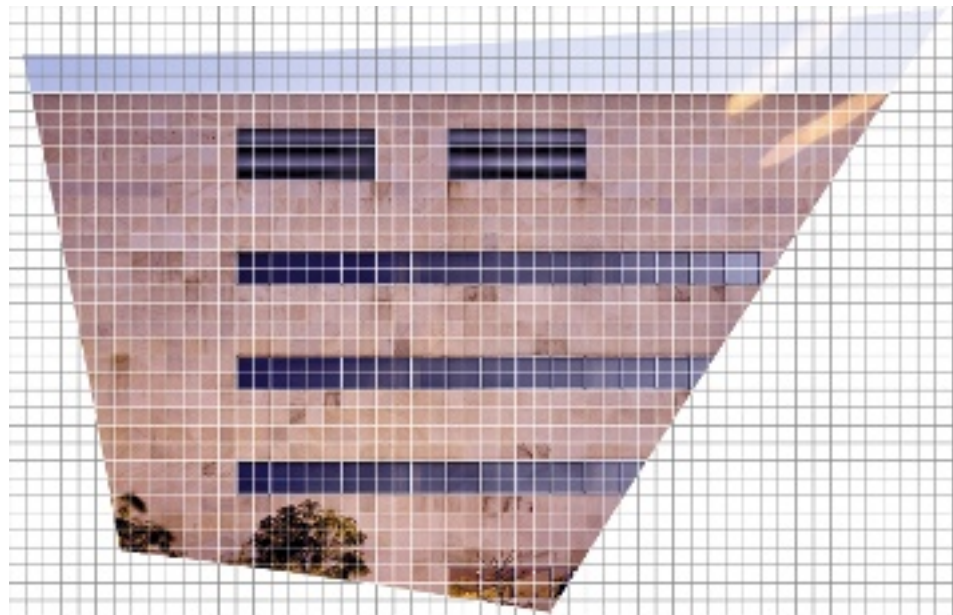
10. Inserting points from vertical lines and horizontal lines.

11. Fotografía rectificada y cuadrícula superpuesta.

11. Rectified photograph with overlaying grid.



10



11



12. Instituto de ciencia animal de la UPV.  
Fotografía inicial y rectificada con líneas de la  
fachada restituída superpuestas.

12. Animal Science Institute at the UPV. Initial  
photography with overlaying lines from the façade.



12

mente y que recuperaremos desde el menú “*Archivo*” → “*Abrir*”

Pulsaremos *Ctrl+P* y comprobaremos, en la lista desplegable “*Proyección*”, que el tipo de proyección es “*Rectilínea*”. Pulsaremos los botones “*Auto*”, “*Ajustar*” y cerraremos la ventana de vista previa.

Las condiciones geométricas se introducirán desde la pestaña “*Puntos de Control*”, donde añadiremos una pareja de puntos por cada recta, indicando un punto en la imagen de la parte izquierda y el otro en la imagen de la parte derecha, tras lo que pulsaremos el botón “*Añadir*” e indicaremos en la lista desplegable “*Modo*”, si se trata de una recta vertical u horizontal.

Como se comentó anteriormente, bastará con indicar dos rectas horizontales y dos verticales pero, si introducimos un número mayor, se compensarán mejor los errores cometidos. Otro aspecto a tener en cuenta es que, cuanto mayor sea la separación entre puntos que definen las rectas, mayor será la precisión de la restitución, por lo que conviene identificar rectas de la mayor longitud posible y señalar dos puntos extremos (Fig.10).

La optimización se realiza desde la pestaña “*Optimizador*”, indicando en la lista desplegable “*Optimizar*” “*Los siguiente parámetros personalizados*”. Se han de marcar casillas de verificación correspondientes a: *giro*(g), *inclinación* (i), *rotación* (r) y

## Results

In order to obtain metric data we can enter the rectified image into any CAD programme and trace directly over the plan which will be in true proportion. We must take into account that, to put it into scale, we must have a real measurement with regard to the measurement we are using to make the scale.

The greater the length measured, the more precise the scale change will be, in this way, in the case of the restoration of a façade, we can measure its width, as it is an accessible and easily obtained measurement.

We won't go into details about the drawing process using CAD programmes as we understand that any technician will be familiar with this type of software. If CAD software is not available, QCAD 5 version GPL may be used to carry out this task. The amount of precision obtained will depend on different factors, some of them human, when



13. Mural de la predicación de San Vicente Ferrer.  
Fotografía inicial y rectificada.

13. Mural of St. Vincent Ferrer's preaching.  
Initial and rectified photography.



13

14. Mural restituído aislado de su entorno.

14. Restored mural isolated from its environment.



14

pinpointing control points on the image, and others due to errors of hypothesis, such as supposing lines which are not straight to be straight or supposing slightly oblique straight lines to be horizontal or vertical, due to errors in the construction process.

If care is taken in the calibration process and the geometric hypotheses entered don't contain excessive errors, very precise results can be obtained, like those, for example, in figure 12, where the height of the restored façade differs by less than a centimetre, from the

*vista* ( $v$ ), que constituyen los parámetros que definen la transformación proyectiva y, sólo en este caso en el que estamos completando la calibración, marcaremos los correspondientes a la distorsión radial que son: *distorsión* ( $a$ ), *barril* ( $b$ ), *distorsión* ( $c$ ), *desplazamiento*  $x$  ( $d$ ) y *desplazamiento*  $y$  ( $e$ ). Después pulsaremos el botón “¡Optimizar ahora!” y podremos ver en la ventana de vista previa (CTRL+P)

15. Ejemplo de corrección de verticales.

15. Vertical correction example.

una previsualización de la ortofoto conseguida.

Para obtener la imagen rectificada definitiva iremos a la pestaña “Empalmador”, donde pulsaremos el botón “Calculate optimal size”, para que el remuestreo sea óptimo con respecto a la resolución de la imagen original, elegiremos el formato de imagen desde la lista “Format” y finalmente pulsaremos sobre “Stitch!” para generar y guardar la imagen.

Los parámetros de calibración se pueden almacenar para utilizar con cualquier otra fotografía realizada con la misma cámara, objetivo y distancia focal, desde la pestaña “Cámara y objetivo”, pulsando el botón “Guardar objetivo” y podrán ser utilizados posteriormente mediante el botón “Cargando objetivo”. La diferencia estará en que en el proceso de optimización bastará marcar en la lista desplegable “Optimizar”, la opción “Posiciones y vista ( $v,i,d,v$ )”.

## Resultados

Para obtener datos métricos podemos insertar la imagen rectificada en cualquier programa de CAD y calcar directamente sobre el plano que queda en verdadera proporción, teniendo en cuenta que, para ponerlo a escala, deberemos conocer una medida real con respecto a la que realizar el escalado.

Cuanto mayor sea la longitud medida, más preciso será el cambio de escala realizado, por lo que, en el caso de la restitución de una fachada, podemos medir su anchura, por tratarse de una medida accesible y fácil de obtener.

No entraremos en detalles acerca del proceso de dibujo mediante programas de CAD por entender que cualquier técnico está familiarizado con este tipo de software. Si no se dispone de software





15

de CAD, se puede usar QCAD 5 versión GPL para realizar esta tarea.

La precisión obtenida depende de diversos factores, a veces humanos, a la hora de precisar puntos sobre la imagen, y otros debido a errores de hipótesis, al considerar como rectas, líneas que no lo son o como horizontales y verticales, rectas ligeramente oblicuas, debido a desviaciones en los procesos constructivos.

Siendo cuidadoso en el proceso de calibración y si las hipótesis geométricas introducidas no se desvían en exceso, pueden obtenerse resultados muy precisos, como en el ejemplo de la figura 12, donde la altura de la fachada restituida difiere en menos de un centímetro, de la medida proporcionada por un distanciómetro láser Leica, siendo que ésta es la dimensión más desfavorable, al haber tomado la anchura del edificio como referencia de escalado.

Otro ejemplo aplicado a la restitución del mural de la predicación de San Vicente Ferrer de Bernabé Matarana, perteneciente a la iglesia del Corpus Christi de Valencia. (Fig.13 y 14)

Por último un ejemplo donde se ha efectuado una transformación para corregir únicamente las verticales (Fig.15). En el proceso de rectificación se han indicado sólo dos rectas verticales. ■

measurement provided by the Leica laser distance meter, taking into account that this was the most unfavourable measurement (as it was the width of the building) which was taken as a reference for the scale.

Another example is the restoration of the mural of the preaching of Saint Vicente Ferrer by Bernabé Matarana, at the church in Valencia. (Fig.13 y 14)

Lastly is an example where a transformation has been carried out in order to correct only the vertical lines (Fig.15). In the rectification process only two vertical lines have been plotted. ■

NOTAS

- 1 / Ecuación Utilizada por el profesor H. Dersch de la universidad de Furtwangen (Alemania), en sus algoritmos de corrección de imagen (panotools), que son la base de programas de cosido de imágenes como Hugin o PTgui.
- 2 / Información y descarga desde <http://hugin.sourceforge.net>
- 3 / Greenleaf, Allen R., *Photographic Optics*, The MacMillan Company, New York, 1950, pp. 25-27.
- 4 / Existen calculadores en línea, para iphone y android en [www.dofmaster.com](http://www.dofmaster.com)
- 5 / Información y descarga desde <http://qcadbin-win.sourceforge.net>

NOTES

- 1 / Equation used by professor H. Dersch of the university of Furtwangen (Germany), in its image correction algorithms (panotools), which are the base of image stitching programmes like Hugin or PTgui.
- 2 / Information and download from <http://hugin.sourceforge.net>
- 3 / There are on line calculators, for iphone and android at [www.dofmaster.com](http://www.dofmaster.com)
- 4 / Information and download from <http://qcadbin-win.sourceforge.net>