

“CONSIDERACIONES ACERCA DEL METODO FOTOGRAMETRICO COMO TECNICA PARA EL LEVANTAMIENTO DE EDIFICIOS Y MONUMENTOS”.

ALVARADO ESTEBE, M. GALINDEZ HERNANDEZ, J. A. SANJUAN FERNANDEZ, P. ROMERO LOPEZ Y ANDRÉS DE DIEGO
 I. I. Politécnica de Valencia. I-2. U. de Las Palmas de Gran Canaria

Introducción. Ecuaciones fundamentales de la fotogrametría terrestre. Consideraciones acerca de las vertientes científica y de producción en la aplicación de la fotogrametría al proceso de intervención del Patrimonio. Métodos simplificados de restitución. Metodología seguida en los siguientes casos: Bóveda Capilla de los Reyes Sto. Domingo (Valencia), Ermita de San Telmo y Casa de los Romero (Las Palmas).

Instrumental utilizado.

Introduction. Fundamental equations of close-range photogrammetry. Considerations about the scientific and productions in the application of photogrammetry to the process of patrimony intervention. Simple restitutions methods. Instrumental and methods used in some cases (Capilla de los Reyes, Sto. Domingo, in Valencia, Ermita de San Telmo and Casa de los Romeros, in Las Palmas de Gran Canaria).

Dentro de los planteamientos propuestos por la organización de este Congreso, nuestro equipo de trabajo pretende exponer las aplicaciones que en el proceso de intervención sobre el Patrimonio puede suponer la técnica de la Fotogrametría aplicada a la arquitectura.

Expondremos los trabajos de restitución fotogramétrica efectuados conjuntamente entre las Universidades de Las Palmas de Gran Canaria y Politécnica de Valencia, así como la línea de investigación que sobre teoría de errores llevamos a cabo bajo la dirección de D. Manuel Chueca Pazos a quien debemos las formulaciones teóricas sobre ajustes rigurosos en Fotogrametría Terrestre.

La Fotogrametría en su acepción general puede definirse como la técnica que permite deducir las coordenadas espaciales de un determinado punto a partir de las coordenadas planas (bidimensionales) del mismo obtenidas en dos fotografías (Fotogramas apoyados) con distintos puntos de vista. Es una técnica de fotointerpretación, que se estudia en las Escuelas de Topografía y en algunos Departamentos de Expresión Gráfica en la Ingeniería y Arquitectura.

La comunicación presentada pretende introducir a las aplicaciones esta técnica, exponer sus utilidades y limitaciones y divulgar este método que cuenta con más de 100 años y que nació curiosa y directamente vinculado a la Arquitectura, pero sin embargo dentro de esta profesión es una perfecta desconocida.

Se dedicará una primera parte de la comunicación para explicar someramente los fundamentos de la Fotogrametría, de modo que queden claros algunos aspectos que tradicionalmente se interpretan erróneamente, y otros referidos al instrumental que se utiliza, que suelen ser confundidos por los no especializados.

De este modo el profesional que tenga conocimientos precisos sobre Fotogrametría puede obviar esta primera parte.

1. Nociones fundamentales sobre Fotogrametría arquitectónica.

El método fotogramétrico es relativamente antiguo, casi tanto como la fotografía. No debió transcurrir demasiado tiempo desde los descubrimientos de Daguerre

para que unos de la fotografía pensaran la forma de medir la escala sobre aquellas primitivas placas. Este problema geométrico estaba resuelto y los geómetras de aquella época sabían resolver mediante la proyectiva la restitución a partir de dos perspectivas cónicas estableciendo una homografía entre figuras de la tercera categoría.

Para ello necesitaban cámaras que obtuvieran imágenes no deformantes de la realidad, es decir que representasen la perspectiva cónica desde el punto de vista del centro óptico de la lente, sin distorsión ni aberración alguna e instrumentos que permitieran formar “el modelo” a escala resultante de la proyección desde ambos fotogramas (perspectivas cónicas).

Estas dificultades “técnico-constructivas” no existían en las formulaciones analíticas, siendo su expresión matemática inicial bien sencilla:

Como sobre una hipotética fotografía sólo podemos medir (físicamente sobre ellas) coordenadas X placa e Y placa y en el modelo real tenemos las tres coordenadas X, Y, Z reales, necesitaremos 2 fotografías para establecer una correlación entre coordenadas placa y coordenadas terreno. Supondremos el caso más favorable y sencillo de dos tomas perpendiculares al modelo a la misma distancia de él, tal como se ve en el corquis.

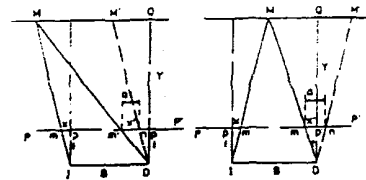


Fig 1.

Suponiendo dos fotografías P y P' verticales y obtenidas desde I y D y siendo M la proyección horizontal de un punto del espacio, P y P' puntos principales de cada placa se tendrá:

$$x = mp \quad \quad \quad x' = mp'$$

Se llama paralaje estereoscópico A a la diferencia de las abscisas anteriores y se representa por:

$$a = x' - x$$

y trazando DM' paralelo a IM se tendrá Dm'n DMM' que implica:

$$\frac{MM'}{m'n} = \frac{DQ}{DP}$$

Fig 2.

y puesto que: MM' = B (IDMM', paralelogramo)
 $m'n = a$
 $DQ = Y$ (distancia al plano de frente)
 $Dp' = f$

se tendrá

$$\frac{B}{a} = \frac{Y}{f} \quad Y = \frac{Bt}{a}$$

Fig 3.

Esta es la ecuación fundamental de la fotogrametría estereoscópica que define la distancia de un plano frontal a la base en función de un paralaje. Todos los puntos de un mismo plano de frente tienen pues la misma paralaje, y para conocer la situación de dicho plano, recíprocamente, bastará con medir la paralaje de uno de sus puntos.

Si suponemos unos ejes cartesianos XYZ con origen en I, foco del fotograma izquierdo (que se toma siempre como fotograma director), sentido positivo de la X hacia la derecha, Y en la dirección de la placa y Z normal al plano XY en I, se tendrá:

$$\frac{X}{x} = \frac{Y}{f} ; X = \left(\frac{x}{f} \right) Y$$

$$\frac{Z}{y} = \frac{Y}{f} ; Z = \left(\frac{y}{f} \right) Y$$

Fig 4.

Se podrán expresar las coordenadas XYZ del punto M del modelo en función de xy. (coordenadas de la imagen M en el fotograma director) y de la paralaje estereoscópica a.

$$X = \left(\frac{x}{f} \right) \left(\frac{Bt}{a} \right) = \left(\frac{B}{a} \right) x$$

$$Y = \left(\frac{B}{a} \right) f$$

$$Z = \left(\frac{y}{f} \right) \left(\frac{Bt}{a} \right) = \left(\frac{B}{a} \right) y$$

Fig 5.

B = base de la toma, es decir distancia entre las dos tomas fotográficas.

f = distancia focal de la cámara (distancia entre el origen de coordenadas del fotograma y el centro óptico de la lente).

a = paralaje del punto.

Necesitaremos fotografías lo suficientemente precisas como para medir sobre ellas. Les denominamos fotogramas y han de cumplir los siguientes requisitos:

1.- Estar exentas de cualquier distorsión y aberración producidas por la lente del objetivo.

2.- Que de algún modo sobre las fotografías queden determinados sus ejes principales x e y para poder medir coordenadas placa y situar en la perpendicular a su origen el centro óptico de la cámara

A las cámaras de este tipo les denominamos cámaras métricas y lógicamente deben disponer de:

1.- Lentes cuyas distorsiones y aberraciones sean mínimas.

2.- Impresionar unas marcas fiduciales que determinen el centro del fotograma.

3.- Tener perfectamente calibrado su distancia focal, de modo que este dato se pueda introducir en los cálculos.

La construcción de las primeras cámaras métricas se remonta a finales del siglo pasado. Cita Bonneval en su tratado de Laussedat como el primero en levantar planos topográficos mediante lo que se denominó "metrographie" y entre sus ejemplos reproduce el levantamiento del Castillo de Vincennes (1850) pero fue el ingeniero alemán Meydenbauer el primero en construir una cámara fotogramétrica. Con placas de gran formato para poder medir directamente sobre ellas, las diseñó de modo que previamente a la toma fotográfica colocaba un goniómetro en su interior para calcular la dirección del eje óptico.

No se pueden dejar de citar sus primeras pruebas en la Iglesia de Freyburg on Unstrut, con fines topográficos y pese a no haber tenido entonces una especial acogida el término FOTOGRAMETRÍA quedó acuñado desde este año de 1867. Fundador del Real Instituto de Fotogrametría de Prusia, a lo largo de su vida él y su equipo tomaron un total de 11.940 fotografías de 1.080 monumentos.

Sus negativos fueron monumentales para la reconstrucción del Patrimonio Arquitectónico Alemán tras la Segunda Guerra Mundial. Los pocos dibujos y levantamientos de aquella época se hacían analíticamente calculando las coordenadas punto a punto aplicando las fórmulas antes mencionadas. Téngase en cuenta que en vida de Meydenbauer no existían los restituidores.

La aparición del instrumento rey de la fotogrametría, el restituidor, permitió el dibujo directo desde los fotogramas. Primero fueron los denominados "analógicos" que reproducen mediante un proceso mecánico la proyección desde las dos fotografías produciendo un modelo a escala de la realidad, y recorriendo este modelo podemos trazar también mecánicamente (fijando una de las coordenadas) sus distintas proyecciones en el sistema diédrico.

La irrupción en la última década de la informática en todos los campos de la técnica ha impulsado también el mundo de los restituidores haciendo desaparecer prácticamente el sistema analógico en favor de los llamados "analíticos". Estos instrumentos, apoyados en ordenadores, calculan las coordenadas reales de los puntos que va marcando el operador y los envían a una serie de archivos informáticos para ser procesados mediante distintos sistemas de CAD.

Entre la toma fotográfica y la restitución se intercala el proceso más tedioso y laborioso de cualquier levantamiento, el apoyo fotográfico, fundamental para la precisión de un trabajo. Consiste en medir la base de toma fotográfica (si la cámara es estereométrica no es necesario, pues es un dato del instrumento) y calcular las coordenadas de una serie de puntos del objeto a fotografiar y poder así antes de restituir efectuar dos operaciones:

1.- Colocar sobre el restituidor las fotografías en la misma posición relativa de la toma real.

Cálculo a escala de modelo proyectivo resultante.

Estas operaciones se denominan "orientación del estereográfico".

Con la restitución sobre la mesa trazadora se cierra el proceso que se ha descrito sucintamente para que el profano en la materia pueda tener una cierta idea de las formulaciones matemáticas básicas y el ciclo secuencial de fotografía, apoyo topográfico y restitución gráfica característico de un levantamiento con esta técnica.

II.- La fotogrametría como técnica de medición y representación. Sus aplicaciones en casos de intervención del Patrimonio Histórico Arquitectónico.

Dos son los campos en los que nuestro método puede ser de utilidad; en la medición y evaluación del error cometido (asunto puramente topográfico) y en la representación gráfica del objeto fotografiado. Estas dos vertientes que podemos denominar científica y de producción no deben aislarse una de otra, como va siendo cada vez más frecuente.

Todo proceso fotogramétrico, tradicionalmente ha llevado parejo el cálculo del apoyo, la orientación de los fotogramas, etc.; un trabajo lento y laborioso en aras de conseguir una determinación puntual o un dibujo "preciso de la realidad". La precisión ha sido el caballo de batalla de la fotogrametría y hasta hace unos pocos años, la reproducción gráfica directa y mecánica de un objeto real sólo era posible desde la fotogrametría.

Se creó la imagen de la fotogrametría como método de dibujo de edificios y monumentos, cuando ello no es sino uno de los aspectos del sistema produciéndose muchas veces levantamientos en los que la calidad gráfica, delineación y en general la presentación de la exposición gráfica primaban sobre el rigor topográfico (apoyo de campo insuficiente, orientaciones poco cuidadas, etc.).

Ultimamente, sin embargo, aparecen más y más métodos de restituciones a partir de fotografías corrientes, o restituciones con apoyo reducido, digitalizaciones de fotogramas, etc.. Son procesos perfectamente válidos sin olvidar el margen de error real en el que nos vamos a mover en cada caso. Antes de efectuar el levantamiento fotogramétrico debe estimarse el margen de error previsible, pues determinará los planteamientos del trabajo en función de la instrumentación a utilizar. Muy pocas veces se requiere la precisión que sin embargo se suele ofrecer. Acudir a restituidores de primer orden, apoyos topográficos muy exactos para obtener a lo sumo unos alzados, o perfiles a escalas de 50, 100 o incluso 25 como base para un proyecto de rehabilitación es innecesario. Además el dibujo que se ofrece desde el restituidor suele carecer de calidad gráfica, incluso si se depura a través de algún programa CAD, a menos que un profesional de arquitectura opere en el restituidor o esté colaborando durante la ejecución del trabajo. La solución típica de redelinear los planos fotogramétricos elimina además la cualidad fundamental: su precisión.

Digitalizando a partir de ampliaciones de fotogramas, corrigiendo con los datos de los puntos de apoyo hemos levantado planos perfectamente útiles para los fines comentados, conscientes del error, perfectamente asimilable que se comete. Los programas gráficos en 2D (Autocad por ejemplo) lo admiten perfectamente. La no compatibilidad entre el sistema informático del Planicomp y los PC impiden el proceso de datos en 3D (Autocad), aunque hemos producido maquetas electrónicas pasando puntos de uno a otro, en modelos de fuerte geometría que facilita el proceso (véase la maqueta de la superficie interior de la bóveda de la Capilla de los Reyes en el Convento de Sto. Domingo).

En casos de determinaciones fotogramétricas de precisión no solo se ha de tener en cuenta el error

cometido en la instrumentación de la cámara, sino el instrumental que se utiliza (límetro, etc.) para la fijación de los puntos de apoyo, parámetros de orientación, etc. Los autores nos establecieron un método para comprobar realmente lo permitido en cualquier punto de un fotograma.

III.- Metodología de trabajo seguida en los siguientes casos: bóveda de la Capilla de los Reyes del Convento de Sto. Domingo (Valencia), levantamientos de la planta y alzados de la Ermita de San Telmo y del alzado principal de la Casa de los Romero (Las Palmas de Gran canaria).
Instrumental utilizado.

Previamente a la ejecución de las tomas fotogramétricas se efectuó un estudio de la localización y número de pares fotogramétricos que se tendrían que realizar para que todos los alzados quedaran representados en su totalidad por duplicado desde una misma base (recubrimiento). A continuación se pasó a elegir cuales iban a ser los puntos de apoyo (P.A) sobre las fachadas a fotografiar., de modo que todos los recubrimientos dispusieran de los P.A necesarios para su posterior restitución. Estos P.A

deben ser detalles que queden puntual y perfectamente definidos sobre la fachada, teniendo en cuenta siempre que sus dimensiones serán considerablemente aumentadas a los ojos del operador de restitución: si no se encuentran puntos que puedan servir para nuestros fines es habitual recurrir al empleo de pequeñas etiquetas de papel adhesivas en las que figure una señal de referencia. Estas etiquetas se pegan en las fachadas, determinando así el punto de apoyo en el lugar de la misma que consideremos más idóneo.

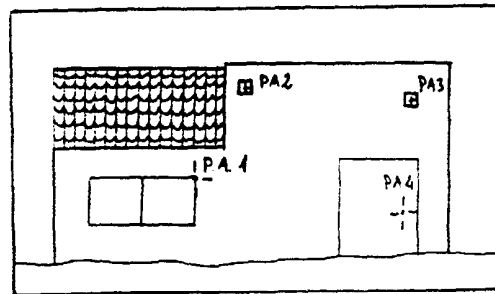


Fig 6.EJEMPLO DE DISTRIBUCION DE LOS PUNTOS DE APOYO EN UNA FACHADA.

Tras la determinación y señalización (si procede) de los P.A necesarios se efectuó la toma fotográfica de los pares simultáneamente desde las dos cámaras que forman la base. Esta toma, en nuestro caso, se realizó con la cámara estereométrica SMK-40 de la casa ZEISS, y se emplearon emulsiones tanto de poliéster como de cristal, en blanco y negro y en color. A su vez, y para facilitar posteriormente las tareas de identificación por parte del operador, se elaboraron croquis de detalle a mano alzada de las fachadas, así como de la situación y numeración de los diferentes P.A dispuestos en las mismas.

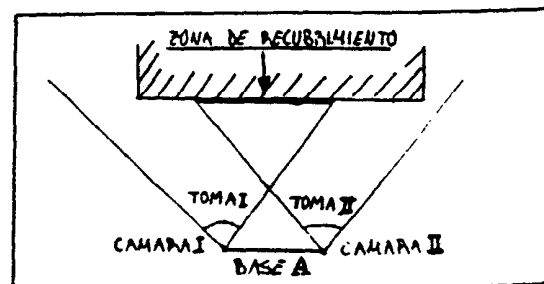


Fig 7 VISTA EN PLANTA DE LAS TOMAS DEL PAR FOTOGAMETRICO

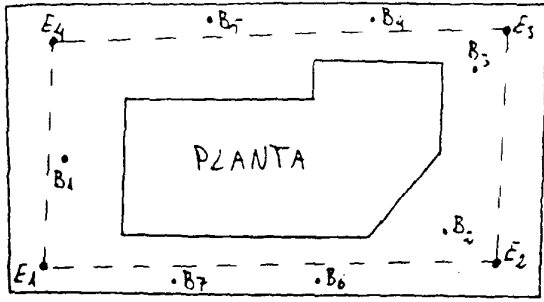


Fig 8 ESTABLECIMIENTO DE LAS ESTACIONES DEL ITINERARIO (BN = BASES FOTOGRAFÉTRICA, EN = ESTACIONES DEL ITINERARIO)

Seguidamente, se realizó el apoyo topográfico, consistente en determinar las coordenadas (X, Y, Z) de cada uno de los P.A., en un sistema de referencia arbitrario. La forma más habitual de determinar estas coordenadas es a partir de una intersección directa desde dos estaciones de coordenadas conocidas, para lo cual se tendrá que observar un itinerario o poligonal, cuyo número

de tramo dependerá de la situación del apoyo a determinar, y desde las estaciones de dicho itinerario efectuar las observaciones angulares pertinentes a los P.A.. En nuestro caso, los itinerarios se observaron con la estación total SET-3 de Sokkisha, la cual nos daba la precisión requerida en este tipo de trabajo. Además se utilizaron teodolitos con apreciaciones de segundos para las observaciones a los puntos de apoyo.

Una vez finalizadas las observaciones de campo, se revelaron las tomas fotográficas, comprobando su calidad para posteriormente restituirlas y se calcularon los itinerarios e intersecciones realizadas, obteniendo finalmente las coordenadas de los P.A. necesarias para la restitución de los pares.

La restitución de los pares se efectuó en el restituidor analítico Planicomp C-120 de la casa Zeiss, y su dibujo se realizó a través de un plotter AO de HP. Puesto que el dibujo obtenido por restitución necesita ser depurado, los datos de la restitución (es decir las coordenadas X, Y, Z, de los puntos que definen la fachada) son volcados en una estación de trabajo y depurados a través del programa de diseño Autocad, quedando los mismos almacenados para producir las copias, vistas, secciones y escalas de dibujo que se deseen.