

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Proyecto Fin de Carrera



30/09/2014

Autor Javier Bustillos Cuellar

Tutor: Manuel Torres Picazo

Departamento de Topografía y fotogrametría

Universidad Politécnica de Cartagena.



Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

AGRADECIMIENTOS:

Este trabajo y mis estudios en general son algo que le tendré que agradecer eternamente a mis padres en primer lugar, a la vida que tuvo que aportar una serie de circunstancias para que todo se produzca de esta forma. A Alejandra Peñalver por esos apoyos en los momentos críticos y su ayuda en todos los momentos en general, a mis hermanos por su ayuda y comprensión, a todos mis compañeros los cuales pasamos horas y días en la biblioteca y a toda mi familia que desde la distancia siempre he recibido su apoyo. Y sin olvidar a mi tutor Manuel Torres Picazo que gracias a su trabajo y apoyo esto se pudo realizar sin ningún contratiempo.

Este trabajo es de vosotros.

Muchas gracias.

Javier Bustillos Cuéllar.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

INDICE

<u>Capítulo 1 Puentes: Historia Y conceptos</u>	10
1.1.- Estudio histórico: Puentes.	11
1.2.- Los maestros de construcción de puentes en el Mundo	14
1.3 Clasificación de puentes.-	19
1.3.1 Puentes de vigas	20
1.3.2 Puentes de arco	20
1.3.3 Puentes de armaduras	21
1.3.4 Puente tipo cantiléver	23
1.3.5.- Puentes colgantes	24
1.3.6.- Puentes de pontones	27
1.4.-Emplazamiento	29

CAPITULO 2

<u>FOTOGRAMETRÍA. CONCEPTOS BÁSICOS</u>	31
2.1.- Introducción.	32
2.2.- Fotogrametría.	32
2.3. LA FOTOGRAMETRÍA EN EL TIEMPO	33
2.3.1 Etapa pre-inicial	33

2.3.2 Etapa inicial	34
2.3.3. Etapa analógica	35
2.3.4. Etapa analítica	39
2.3.5. Etapa digital	40
2.4. LAS APLICACIONES DE LA FOTOGRAMETRIA	42
2.5. TIPOS DE IMÁGENES	43
2.5.1. Cámara fotográfica	43
2.5.2. Digital o Analógico	45
2.5.3. De analógico a digital	47
2.6. PRINCIPIOS DE LA FOTOGRAMETRÍA	49
2.6.1.- Definición y evolución histórica	49
2.6.2.- Fotogrametría aérea y fotogrametría Terrestre. Aplicaciones	50
2.6.3.- FUNDAMENTOS DEL MÉTODO	51
2.6.3.1.- Proyección central y proyección Ortogonal	51
2.6.3.2.- Visión estereoscópica. Concepto de paralaje.	53
2.6.3.3.- Método general de la fotogrametría	53
2.6.3.4.- Fotografías y fotogramas. Definiciones geométricas	55

2.6.4.- ORIENTACIÓN DE PARES DE FOTOGRAMAS	57
2.6.4.1.-Orientación	58
2.6.5.- Puntos de apoyo. Concepto de Aero triangulación. GNSS aerotransportado	62
2.6.6.-EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN	62
2.6.6.1.-Instrumentos empleados	62
2.6.6.2.-Restitución de pares de fotogramas	65
2.6.6.3.-Automatización de procesos	66
2.6.6.4.-Concepto de ortoproyección	66
2.7.- LEVANTAMIENTOS POR FOTOGRAMETRÍA TERRESTRE	68
2.8.- LEVANTAMIENTOS POR FOTOGRAMETRÍA AÉREA	70
2.8.1.-Altura de vuelo	72
2.8.2.-Recubrimientos, base y distancia entre pasadas	72
2.8.3.-Plan de vuelo. Geometría del vuelo. Limitaciones a considerar	74
<u>Capítulo 3 Calibración.</u>	77
3.1.-introducción.-	78
3.2.- Procedimientos	79
3.3.- Calibración con Photomodeler	80

<u>Capítulo 4 TRABAJO DE CAMPO</u>	83
4.1.- Introducción	84
4.2.- Aplicación del Photomodeler.	85
<u>Capítulo 5</u>	99
5.1.-Bibliografía	100

Introducción al proyecto
y objetivos del proyecto

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Introducción.- Nuestro proyecto será la realización de un modelado en 3D de puente ubicado en sangonera la verde, para ello nos ayudaremos de dos grandes herramientas, programas informáticos muy completos como son el Photomodeler y AutoCAD, El primero lo utilizaremos para el primer paso que será la toma de fotografías y mediante ellos poder obtener una serie de puntos que estén orientados y dimensionados para el correcto uso con el AutoCAD, este proceso será muy útil y muy cómodo gracias a la finalidad del proyecto ya que con la toma de una serie de fotografías podemos obtener puntos en 3D del objeto a estudiar. Y con la ayuda de una Estación total obtendremos las coordenadas para el correcto posicionamiento de nuestro objeto a estudiar en este caso el puente ubicado en sangonera la verde. Este último paso lo realizamos para poder exportar los datos al AutoCAD y poder trabajar en magnitudes reales.

Para ello los pasos a seguir lo veremos más adelante, pero como primer paso y uno de los más importantes es la calibración de la cámara para poder minimizar los errores. Por eso ese será nuestro primer paso el proyecto que lo veremos en el capítulo 3.

Capítulo 1

Puentes:

Historia Y conceptos

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

1.1.- Estudio histórico: Puentes.

Conocido desde la antigüedad, el puente se presentó en sus inicios como una construcción de madera. Heródoto describe la construcción de un puente de barcas por los soldados del rey Jerjes, y también se refiere a un gran puente construido en tiempo de Nabucodonosor, que, atravesando el Éufrates, unía las dos partes de Babilonia, con una longitud de más de 900 m. Los puentes más antiguos de piedra fueron construidos por los egipcios del Imperio Antiguo (h. -2500). Grandes constructores de puentes fueron los romanos, que asimilaron las técnicas



Ilustración 1

Un puente tronco en los Alpes franceses cerca de Vallorcine.

Este archivo se encuentra bajo la licencia Creative Commons

de los etruscos y las desarrollaron posteriormente con magníficos resultados, según muestran los múltiples puentes que desafiando el paso del tiempo han llegado hasta la actualidad, algunos de ellos en servicio todavía. Los puentes romanos más antiguos estaban construidos de madera, como el famoso Sublicio, citado

por Horacio Coclite.

Posteriormente adoptaron el empleo de piedras y grandes sillares, como en el puente construido en el año 104 sobre el Danubio, por Apolodoro de Damasco. Las técnicas constructivas fueron perfeccionándose, se adoptaron el mortero y la bóveda y se mejoró el sistema de cimentación de las pilas.

La historia de los puentes es también la historia de la ingeniería estructural. El problema de pasar un vano construyendo una estructura fija se ha repetido a lo largo del tiempo con distintas soluciones. Según se fue avanzando en el conocimiento de los materiales y la forma en que éstos resisten y se fracturan hizo que se construyeran cada vez puentes más altos y con mayor vano y con un menor uso de materiales. La madera quizás fuese el primer paso,

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

después la piedra, el ladrillo que dieron paso al acero y al hormigón en el siglo XIX. Y aún la evolución continúa, en la actualidad nuevos puentes de fibra de carbono son diseñados con luces mayores y espesores nunca vistos antes.

Los orígenes de la idea de puente

Los primeros puentes se realizaron seguramente por elementos naturales simples, como un tronco dejado caer sobre un arroyo o unas piedras dispuestas en un río. Los primeros puentes seguramente serían una combinación de rocas apiladas como pilares sosteniendo los maderos que funcionaban como tableros. Se sabe que algunas tribus americanas usaron árboles y cañas para construir pasarelas que les permitían salvar agujeros en las cavernas. Con el tiempo supieron crear cuerdas que permitían unir los distintos elementos del puente. Estas cuerdas también sirvieron para crear primitivos puentes de cuerdas atados a los dos lados que se querían cruzar. En cierta manera así nacieron los puentes colgantes.

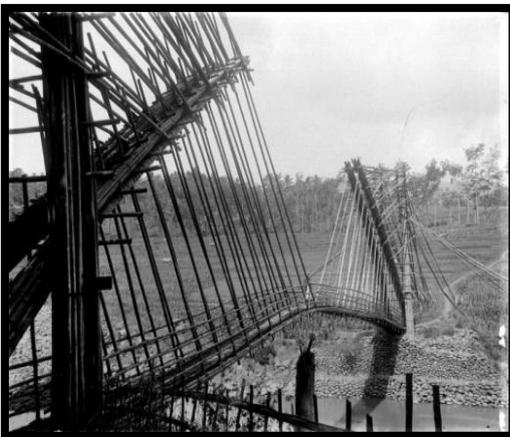


Ilustración 2

Puente de bamboo sobre el Río Serayu en Java, Indonesia.

Este archivo se encuentra bajo la licencia Creative Commons

Los romanos desarrollaron la cimentación bajo el agua mediante cajones de madera de dobles paredes, llenos de hormigón, o con gruesos bloques paralelepípedicos. En los puentes de más de una arcada recurrían a estrechar las vías de agua mediante pilotes muy gruesos o represas. Los pilares estaban formados por grandes bloques, que producían una disminución de la luz de los vanos, lo que era causa de hundimientos debido al aumento de la velocidad del agua. La luz de los arcos en general era inferior a 20 m, si bien destacan algunos sobre esta distancia, como el puente de Alcántara (Cáceres, España), con

28,6 m, y el puente Augusto, en Narni (Italia), con 42 m; este último es el de mayor luz de los conocidos.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde



Durante la Edad Media el ritmo de construcción de puentes decreció de modo ostensible y se limitó prácticamente a la reconstrucción de algunos puentes romanos. La construcción era irregular y desproporcionada, con pilas enormes y arcos generalmente desiguales. Muchos eran de arco único, con escasa cuerda. Uno de los más atrevidos es el de Trezzo, sobre el río Adda, en Italia, con un arco único de 72 m, construido en 1370. Cabe citar

también de esta época el de San Juan de la Abadesas (Cataluña, España), el de Aviñón, en el Ródano, y el puente de las Gracias en Florencia.

	COMPRESIÓN	FLEXIÓN	TRACCIÓN
PREHISTORIA	Arcilla (tapial, adobe, ladrillo)	Madera	Cuerdas
HISTORIA CLÁSICA	Piedra	Madera	Madera Grapas metálicas
s. XIX	Fundición	Madera	Cadenas de hierro
s. XX (1ª 1/2)	Hormigón en masa Acero laminado	Hormigón armado Acero laminado	Cables de acero
s. XX (2ª 1/2)	Hormigones especiales Acero laminado	Maderas laminadas Hormigón pretensado Acero laminado Aleaciones ligeras	Cables de acero de alta resistencia, alto límite elástico y baja relajación

Tabla 1.- utilización de los materiales en las sucesivas épocas históricas

1.2.- Los maestros de construcción de puentes en el mundo

ALEXANDRE GUSTAVE EIFFEL (Dijon, 1832 - París, 1923)

Ingeniero y constructor francés, conocido sobre todo por la torre de París que lleva su nombre. Pertenecía a una familia de artesanos parisinos y mercaderes de madera y carbón. Después de estudiar en el Lycée Royal de Dijon, y más tarde en el Collège Sainte-Barbe en París, en 1855 se graduó en la École Centrale des Arts et Manufactures de París y se unió a una compañía que fabricaba máquinas de vapor, herramientas y otros productos. En 1858, dicha compañía recibió un contrato para erigir un puente férreo en Burdeos. Eiffel fue designado para supervisar la construcción, y lo hizo con tanto éxito que en 1866 fundó su propia compañía y se hizo famoso con rapidez por sus estructuras de metal. A partir de 1872 empezó a atraer contratos extranjeros, y en 1877 levantó un puente sobre el río Duero en Portugal, que consistía en un arco individual de acero de 160 m de altura. El interés de Eiffel no era sólo comercial; su trabajo combinaba una artesanía inigualable con un elegante diseño, tal como se observa en el viaducto Garabit de Francia, que durante un tiempo fue el puente más alto del mundo. En 1884, su fábrica era famosa en el mundo entero. Fundió la gigantesca estatua de la Libertad iluminando al mundo de Auguste Bartholdi, inaugurada en Nueva York en 1886. Poco después, en 1887, empezó a trabajar en su mayor proyecto, la torre Eiffel, sobre una margen del río Sena en París, que terminó para la Exposición Universal de 1889. La imponente torre, con sus 6.300 toneladas de hierro forjado en 18.000 piezas unidas por 2.500.000 remaches, tiene una altura de 300 m. Hasta hoy sigue dominando el cielo de París. A principios de 1890, Eiffel abandonó la dirección cotidiana de sus negocios y se dejó absorber por la nueva ciencia de la aerodinámica, a la que contribuyó en medida notable. Eiffel continuó las investigaciones aeronáuticas, gracias al establecimiento del laboratorio aerodinámico de Auteuil, en 1912. Allí dirige vuelos experimentales y desarrolla adelantos en mecánica. Numerosas obras de infraestructura, a lo largo de Europa, que requerían estructuras metálicas, son obra de Eiffel.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

- Puente María Pía sobre el río Duero, Oporto. 1877
- Viaducto de Garabit, Garabit (Francia). 1882
- Puente sobre el río Nive en Bayona
- Puente en la línea Madrid-Cáceres
- Viaducto de Vianna

También cabe mencionar, el pabellón de la ciudad de París en la Exposición Universal de 1878 y la cúpula giratoria para el observatorio de Niza.

LEONARDO FERNÁNDEZ TROYANO (Madrid, 1938 -)

Nació en Madrid en 1938. Estudió el bachillerato en el colegio Estudio. Terminó la carrera de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos en 1963. Obtuvo el título de doctor en 1965. En 1963 empezó a trabajar con su padre, Carlos Fernández Casado, formando una oficina de proyectos, que en 1966 se transformó en la empresa Carlos Fernández Casado S. A., y más tarde en Carlos Fernández Casado S. L., donde sigue trabajando actualmente. Entre los proyectos de puentes donde ha intervenido directamente o ha dirigido, destacamos los siguientes:

- Puente de Castejón sobre el río Ebro. Luz 101 metros. 1967
- Pasarela de las Glorias Catalanas en Barcelona. 1974
- Puente Sancho el Mayor sobre el río Ebro. Luz 140 m. 1978
- Puente de Metlac. México. Ferrocarril. Luzes de 90 m. Altura de pilas 130 m. 1984
- Puentes colgantes ligeros sobre el río Segre. Luz máxima 101 m. 1985
- Puente sobre el río Besós en Barcelona. Luz 68 m. 1992
- Puente sobre el río Papaloapan. México. 203 m de luz. 1994

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

- ☑ Puente sobre el río Lérez en Pontevedra. 125 m de luz. 1995

Ha trabajado también en proyectos de reconstrucciones, restauraciones y recalces de puentes históricos. Ha sido profesor encargado de la asignatura Puente y profesor de doctorado de la asignatura Puentes atirantados en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, entre los años 1968 y 1980.

Autor del libro Los pasos históricos de la Sierra de Guadarrama. 1ª edición 1990. 2ª edición 1994.

ROBERT MAILLART (Berna, 1872 - Génova, 1940)

Nace en Berna, Suiza, el 6 de febrero de 1872 y muere el 5 de abril de 1940 en Génova, Suiza. Estudia Ingeniería Civil en el Instituto Tecnológico Federal (ETH) de Zúrich. Este ingeniero suizo recoge la herencia analítica constructiva y formal del s. XIX y crea la tradición del que ha sido el material de la primera mitad del s. XX: el hormigón armado. Con 27 años de edad, gana el concurso convocado por el ayuntamiento de Zúrich para construir el puente de Stuffacher.

En 1912 construye el puente Aare de Aarburg. Se trata de un arco de 67,9 m de abertura con una relación flecha/luz de 9,75 m. Trece años después del puente de Aare, en 1925, tras su experiencia como constructor de naves industriales y almacenes vuelve Maillart al problema de losa de circulación y bóveda resistente, en el puente de Valtschielbach. Robert Maillart tiene 61 años cuando en 1933 aborda la construcción de una de sus obras maestras y una de las piezas clave del arte de construir del s. XX: el puente de Schwanbach. Con una luz reducida 37,4 m y una flecha muy peraltada de 6 m (la relación luz/flecha en Valtschielbach es 8,3 y ahora de 6) parece abandonar los esfuerzos gimnásticos y centrarse en depurar por completo su experiencia. La estructura más conocida de Maillart es el puente de Salginatobel, terminado en 1930. Su proyecto se basa en el arco de caja hueca del desaparecido puente de Tavanasa (destruido en 1927 por una avalancha que ningún puente hubiese resistido). Salginatobel también fue el puente de vano más largo construido por Maillart, 90 m, y tenía la situación más espectacular de todas sus estructuras, salvando a 80 m

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

de altura el desfiladero por donde corre el arroyo Salgina. Fue el primer puente de hormigón al que se asignó la calificación de hito histórico internacional de la ingeniería civil en 1991.

- Puente Stuffacher, Zúrich. 1899
- Puente de Zuoz, sobre el río Inn. Arco de caja hueca.1901
- Puente Tavanasa, sobre el Rin. 1906. Destruído en 1927 por una avalancha.
- Puente de Aare, Aarburg. Arco de 67,9 m de luz (flecha/luz, 9,75 m). 1912
- Puente de Flienglibach, 1923. Arco de tablero reforzado (1°)
- Puente Valtschielbach. Relación flecha/luz, 8,3 m.1925
- Viaducto Grand Fey. 1925
- Puente Salginatobel, sobre el arroyo Salgina. 1930
- Puente sobre el río Landquart
- Puente pasarela Töss
- Puente de Schwanbach. Luz de 37,4 m (flecha/luz, 6 m). 1933
- Puente sobre el río Arve, Vessy. 1936
- Puente de Lachen, orilla sur del lago de Zúrich. 1940

EDUARDO TORROJA MIRET (Madrid, 1899 - Madrid, 1961)

Eduardo Torroja Miret nació en Madrid el 27 de Agosto de 1899 y le sobrevino la muerte trabajando en el Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento el 15 de junio de 1961. Hijo de Eduardo Torroja Caballé, arquitecto y doctor en Ciencias, con una muy extensa publicación en matemáticas y geometría, fue un gran divulgador de estas materias en las

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

corrientes de enseñanza que se dieron en España a principios de siglo, como reflejo de los nuevos movimientos europeos

Fue uno de los más grandes ingenieros de su tiempo. En la mayoría de sus obras fue un gran renovador aplicando a sus estructuras arquitectónicas el hormigón armado. Sus trabajos se encuentran repartidos en Europa, América y África. Su principal característica constructiva se observa una conjugación de las técnicas más avanzadas en el empleo del hormigón armado con unas formas revolucionarias nunca utilizadas hasta este momento.

- Viaducto de Quince Ojos, en la Ciudad Universitaria de Madrid, construido por Agromán en 1933 con la colaboración del Arquitecto M. López Otero.
- Viaducto del Aire de la Ciudad Universitaria, construido por Agromán en 1933.
- Puente sobre el río Muga, también construido por OMES en 1939.
- Puente sobre el río Tordera, emplazado en la Carretera Nacional II entre Barcelona y Gerona, construido por OMES en 1939, con la participación del ingeniero G. Andreu.
- Puente del Pedrido Tramo Central, situado en la Ría de Betanzos en A Coruña, construido en 1940 por C. Barredo
- El Gran Arco del Viaducto Francisco Martín Gil, situado en la línea férrea de Zamora a La Coruña, construido por OMES y R. Barredo en 1940 con la colaboración de los ingenieros C. Villalba y A. Salazar
- Puente Dar Drius, en Marruecos, construido en 1959.
- Puente de Amrez, en Marruecos, construido en 1959

1.3 Clasificación de puentes.-

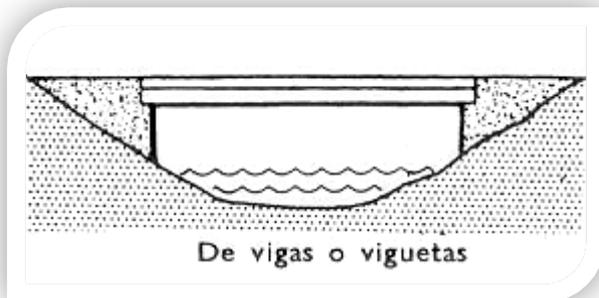
El material con que se construyen (o se han construido) los puentes suele ser madera, fábrica, metálico, hormigón armado y hormigón pretensado, dependiendo del lugar, de la época, del coste,.... Los puentes de madera son ligeros, baratos, poco resistentes, de corta duración y muy vulnerables; actualmente sólo se conciben en obras provisionales. Los puentes de fábrica, en piedra, ladrillo y hormigón en masa, son siempre puentes en arco, pues estos materiales sólo resisten esfuerzos de compresión; su duración es ilimitada, pues todavía se usan puentes romanos, sin prácticamente gastos de conservación. La imposibilidad de mecanizar su construcción hace que sean de coste muy elevado. Con los puentes de fábrica, prácticamente únicos hasta el s. XVIII, no pueden alcanzarse grandes luces, por lo que no se construyen. El desarrollo de la industria metalúrgica orientó hacia los metales la técnica de construcción de puentes, impulsada particularmente por el desarrollo del ferrocarril. Los puentes metálicos, inicialmente contruidos con hierro colado y hierro forjado y, después, con acero laminado, marcaron una época en la ingeniería de caminos, pues admiten las más diversas soluciones técnicas, permiten grandes luces a la altura justa, se prestan a sustituciones y ampliaciones y son de rápida construcción. Sus inconvenientes son el elevado precio de la materia prima, los gastos de mantenimiento por su sensibilidad a los agentes atmosféricos y gases corrosivos y su excesiva deformación elástica. Estos puentes pueden ser de arco, viga, tirantes, etc.; y el acero puede presentar diversas formas según trabaje por tracción, compresión o flexión, pudiendo estar unidas las piezas por remachado en caliente o por soldadura fundamentalmente. Las pilas y estribos pueden ser de hierro o, generalmente, de hormigón. Los puentes metálicos se prestan a atrevidas concepciones para puentes móviles y colgantes. Los puentes de hormigón armado, posteriores cronológicamente a los metálicos, son preferentemente de arco y viga, adaptándose el hormigón a variadas soluciones que permiten aprovechar un mismo elemento para varios fines. Admiten luces intermedias entre los de fábrica y los metálicos, no tienen gastos de mantenimiento y son de rápida construcción, particularmente si se utilizan elementos prefabricados. Al ser discreto su coste se utiliza mucho e construcciones no muy atrevidas. Los puentes de hormigón pretensado, que permiten grandes luces con suma esbeltez, son de rápido montaje, no precisan

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

gastos de mantenimiento y presentan grandes posibilidades estéticas; se han impuesto actualmente en las principales redes viarias del mundo.

1.3.1 Puentes de vigas

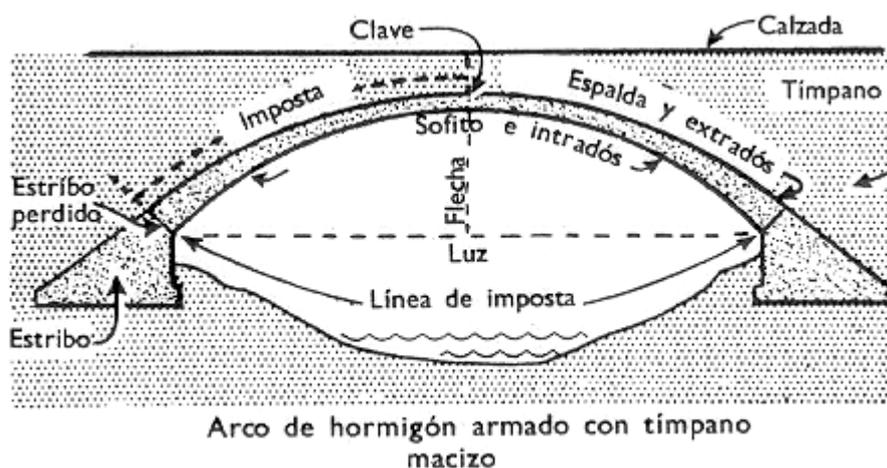
Puentes de vigas. Consisten en varios de estos órganos, que, colocados paralelamente unos a otros con separaciones de 1,2 a 1,5 m, salvan la distancia entre estribos o pilas y soportan el tablero. Cuando son ferroviarios, disponen de vigas de madera o acero y sus pisos pueden ser



abiertos o estar cubiertos con balasto o placas de hormigón armado. Los destinados a servir el tráfico de vehículos son de acero, hormigón armado o pretensado o madera. Las vigas metálicas pueden ser de sección en "I" o de ala ancha; los caballetes de madera forman vanos con vigas o largueros

que descansan en pilas de pilotes del mismo material o en pilotes jabalconados. Los puentes de vigas de hormigón armado o de acero pueden salvar tramos de 20 a 25 m; para distancias superiores se utilizan mucho el acero y el hormigón pretensado y, cuando la longitud es considerable, las vigas son compuestas. Se han construido algunos puentes con vigas de hormigón pretensado, de sección en "I", que salvan tramos de hasta 48 m.

1.3.2 Puentes de arcos.



Cuentan entre los más atractivos logros de la ingeniería. Se construyen de acero, de hormigón armado o pretensado y, a veces, de madera. Hasta poco antes de iniciarse el

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

siglo XX fue utilizado la piedra labrada. Esta clase de puentes pueden ser de tímpano de celosía diagonal, cuya rigidez queda asegurada por miembros diagonales colocados entre el cuerpo del arco (intradós) y el tablero; arco de celosía vertical; o arco de arcadas macizas o de viga de alma llena. En estos últimos tipos, la rigidez de las nervaduras asegura la del arco. Las vigas de alma llena pueden seguir el modelo de viga de palastro o pueden ser vigas armadas tubulares con dos placas de alma unidas a pestañas de amplitud suficiente para acomodar a ambas. Los arcos de arcadas macizas o de celosía vertical pueden ser de tablero inferior, pero los de tímpano de celosía diagonal han de ser necesariamente de tablero superior.

Si son de acero, pueden construirse con articulaciones doble, con los goznes en los estribos solamente, o triple, en cuyo caso existe una articulación más situada en la clave del arco. Los arcos de celosía vertical o de arcadas macizas pueden estar unidos a los estribos de forma rígida, en cuyo caso componen un arco fijo no articulado. Las articulaciones tienen por objeto permitir los pequeños desplazamientos causados por las variaciones de carga y temperatura. Los puentes arqueados de hormigón armado más corrientes son del tipo fijo, con tímpano abierto o macizo; en ambos casos han de ser de tablero superior. En los puentes de tímpano macizo el espacio situado entre el intradós del arco y el tablero está relleno de tierra. Los puentes en arco de hormigón armado y tablero inferior son muy comunes; la calzada discurre entre los arcos. También se han construidos arcos de tímpano de celosía con hormigón y madera.

Los arcos de tímpano macizo deben salvar en un solo tramo toda la anchura del obstáculo; los de tímpano de celosía pueden tener varios ojos; los de tablero inferior tienen generalmente dos. Las nervaduras de los arcos de hormigón armado para tramos largos suelen ser huecas.

1.3.3 Puentes de armaduras

Puentes de armadura rígida combinan las planchas y estribos de los puentes de placas con las vigas y estribos de los de viga; esta combinación forma unidades sencillas sin articulaciones de unión entre las piezas. Se construyen de hormigón armado o pretensado o de armaduras de acero rodeadas de hormigón. De origen muy reciente, resultan sumamente útiles para separar en niveles los cruces de carreteras y ferrocarriles. En estos cruces suele ser conveniente que la

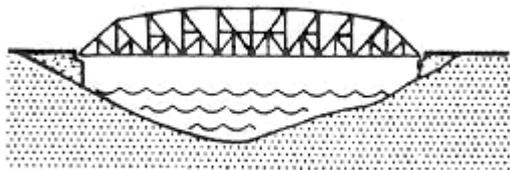
Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

diferencia de niveles sea mínima y los puentes de la clase que nos ocupa son susceptibles de recibir menor altura en un mismo tramo que los otros tipos.

Puentes de armadura sencilla.

Las armaduras de los puentes modernos adoptan muy variadas formas. Las armaduras Pratt y Warren, de paso superior o inferior, son las más utilizadas en puentes de acero de tramos cortos. La Howe sólo se emplea en puentes de madera; sus miembros verticales, construidos con barras de acero, están en tensión, al igual que el cordón inferior, que es de madera.

Para los puentes de tramos largos se emplea la armadura Parker, de cordón superior curvo, también llamada armadura Pratt, y para los de vanos largos y viga de celosía sencilla se



De armadura

utilizan estructuras con entrepaños subdivididos, como la armadura Warren; la Petit con cordones paralelos, también denominada de Baltimore, la Petit con cordón superior inclinado, que también se llama de Pensilvania, y la viga de celosía en «K».

En la Petit y el Warren subdividido, los órganos verticales cortos que aparecen en las figuras respectivas se suelen prolongar hasta el cordón superior para servirle de soporte. Las armaduras para vanos largos están subdivididas en forma que la longitud de los largueros no sea excesiva; a medida que aumenta la anchura del vano, debe hacerlo la altura de la armadura tanto para evitar las flexiones excesivas como por razones de economía. El Warren subdividido, Petit y «K» pueden ser de tablero inferior superior y de diverso número de entrepaños en la armadura según las necesidades de cada caso. Los miembros metálicos de los puentes con viga de celosía se construyen de muy diversas formas. Los de madera adoptan secciones rectangulares.

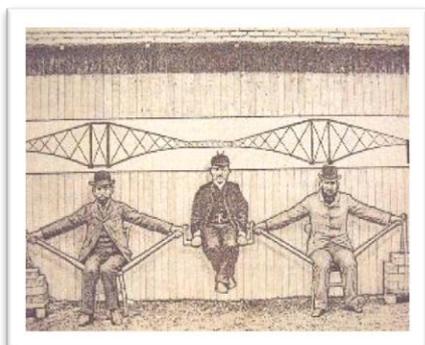
Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

1.3.4 Puente tipo cantiléver

Tienen especial aplicación en tramos muy largos. Reciben su nombre de los brazos voladizos (cantiléver) que se proyectan desde las pilas. Los brazos voladizos también pueden proyectarse hacia las orillas para sustentar los extremos de dos tramos suspendidos. Es posible realizar combinaciones variadas como las que incorpora el puente del Forth, ya que pueden utilizarse todos los sistemas de armaduras a excepción de la Howe. El principio del puente cantiléver puede aplicarse fácilmente a los puentes de armadura de acero y tablero superior. Existen viaductos de hormigón armado o de vigas armadas metálicas en cantiléver; puentes de armadura de hierro que combinan el principio cantiléver con el arco para formar el sistema conocido con el nombre de puente de arco cantiléver. El arco puede estar articulado en las pilas; en tal caso se asemeja a un puente de doble articulación, que puede convertirse en triple añadiendo otra articulación a la clave.

El puente de Firth of Forth construido por John Fowler y Benjamín Baker entre los años 1881 y 1890 sobre el estuario del Forth cerca de Edimburgo inicia la estirpe de puentes complejos con más de un vano principal. Sus dimensiones dan idea del esfuerzo titánico que fue necesario desplegar para llevarlo a cabo.

Longitud (L.) total.....2528,62 m
Vanos principales.....521,21 m
Longitud del voladizo.....207,26 m
Gálibo.....45,72 m
L. vigas centrales apoyadas..... 106,68 m



La famosa fotografía de Benjamín Baker, en la que un modelo vivo figuraba el principio de voladizos en que se basa la solución al puente sobre el Forth. "Cuando se pone una carga en la viga central, sentándose una persona en ella, los brazos de los hombres y los cuerpos de los hombres, de hombros abajo y los bastones entran en compresión. Las sillas representan las pilas de granito.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Imagínense las sillas separadas 500 m y las cabezas de los hombres tan altas como la cruz de S. Pablo (iglesia londinense, 104 m) sus brazos representados por vigas de acero y los bastones por tubos de 3,5 m de diámetro en la base y se obtiene una buena noción de la estructura"

En 1866 el ingeniero alemán Henrich Gerber patentó un sistema que llamó viga Gerber, y que en los países anglosajones se conoció después como viga cantiléver. Esta patente consiste en introducir articulaciones en una viga continua para hacerla isostática, de forma que se convierte en una serie de vigas simplemente apoyadas prolongadas en sus extremos por ménsulas en vanos alternos que se enlazan entre sí por vigas apoyadas en los extremos de las ménsulas. Con este sistema se tienen las ventajas de la viga continua y de la estructura isostática: de la viga continua, porque la ley de momentos flectores tiene signos alternos en apoyos y centros de vanos igual que en ella, y por tanto sus valores máximos son menores que en la viga apoyada; de la estructura isostática, porque sus esfuerzos no se ven afectados por las deformaciones del terreno donde se apoyan, condición fundamental, y en ocasiones determinante, cuando el terreno de cimentación no es bueno. La viga Gerber tiene otras ventajas sobre la viga continua:

- a) En primer lugar se pueden fijar los apoyos principales y hacer móviles las articulaciones, acumulando en ellas las deformaciones por temperatura de la estructura.
- b) En segundo lugar, y ésta era probablemente una de las principales cuando se empezaron a utilizar, la determinación analítica de las leyes de esfuerzos en ellas es mucho más fácil que en las vigas continuas, a causa precisamente de su isostatismo.

Su principal inconveniente son las articulaciones que hay que crear en ella. Esta estructura se utilizó con frecuencia en los puentes de madera orientales, en China, los países del Himalaya, y en Japón.

1.3.5.- Puentes colgantes

En los puentes colgantes, la estructura resistente básica está formada por los cables principales, que se fijan en los extremos del vano a salvar, y tienen la flecha necesaria para soportar mediante un mecanismo de tracción pura, las cargas que actúan sobre él.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

El puente colgante más elemental es el puente catenaria, donde los propios cables principales sirven de plataforma de paso.

Paradójicamente, la gran virtud y el gran defecto de los puentes colgantes se deben a una misma cualidad: su ligereza. La ligereza de los puentes colgantes, los hace más sensibles que ningún otro tipo al aumento de las cargas de tráfico que circulan por él, porque su relación peso propio/carga de tráfico es mínima; es el polo opuesto del puente de piedra. Actualmente los puentes colgantes se utilizan casi exclusivamente para grandes luces; por ello, salvo raras excepciones, todos tienen tablero metálico.

El puente colgante es, igual que el arco, una estructura que resiste gracias a su forma; en este caso salva una determinada luz mediante un mecanismo resistente que funciona exclusivamente a tracción, evitando gracias a su flexibilidad, que aparezcan flexiones en él. El cable es un elemento flexible, lo que quiere decir que no tiene rigidez y por tanto no resiste flexiones. Si se le aplica un sistema de fuerzas, tomará la forma necesaria para que en él sólo se produzcan esfuerzos axiales de tracción; si esto lo fuera posible no resistiría. Por tanto, la forma del cable coincidirá forzosamente con la línea generada por la trayectoria de una de las posibles composiciones del sistema de fuerzas que actúan sobre él. Esta línea es el funicular del sistema de cargas, que se define precisamente como la forma que toma un hilo flexible cuando se aplica sobre él un sistema de fuerzas. La curva del cable de un puente colgante es una combinación de la catenaria, porque el cable principal pesa, y de la parábola, porque también pesa el tablero; sin embargo la diferencia entre ambas curvas es mínima, y por ello en los cálculos generalmente se ha utilizado la parábola de segundo grado. El cable principal es el elemento básico de la estructura resistente del puente colgante. Su montaje debe salvar el vano entre las dos torres y para ello hay que tenderlo en el vacío. Esta fase es la más complicada de la construcción de los puentes colgantes. Inicialmente se montan unos cables auxiliares, que son los primeros que deben salvar la luz del puente y llegar de contrapeso a contrapeso. La mayoría de los grandes puentes colgantes están situados sobre zonas navegables, y por ello permite pasar los cables iniciales con un remolcador; pero esto no es siempre posible. Como el sistema de cargas de los puentes es variable porque lo son las cargas de tráfico, los puentes colgantes en su esquema elemental son muy deformables. Este esquema elemental consiste en el cable principal, las péndolas, y un tablero sin rigidez, o lo que es lo mismo, con articulaciones en los puntos de unión con las péndolas. En la mayoría de los puentes colgantes, las péndolas que soportan el tablero son verticales.

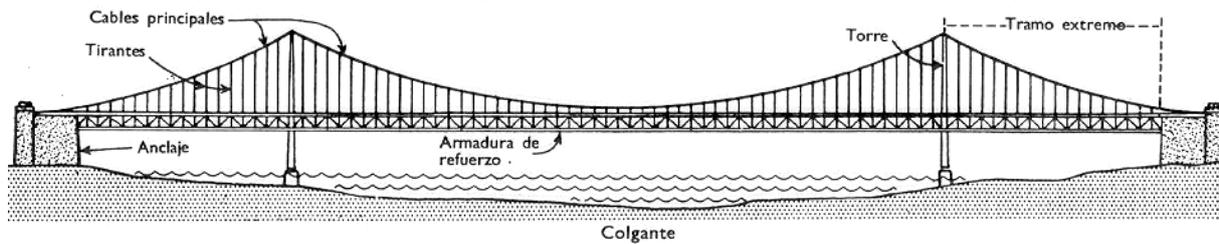
Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

El esquema clásico de los puentes colgantes admite pocas variaciones; los grandes se han hecho siempre con un cable principal en cada borde del tablero.

Las torres han sido siempre los elementos más difíciles de proyectar de los puentes colgantes, porque son los que permiten mayor libertad. Por eso en ellas se han dado toda clase de variantes. En los años 20 fueron adquiriendo ya una forma propia, no heredada, adecuada a su función y a su material; la mayoría tienen dos pilares con sección cajón de alma llena, unidos por riostras horizontales, o cruces de San Andrés. En los últimos puentes colgantes europeos construidos con torres metálicas, se ha utilizado un nuevo sistema de empalme de las chapas que forman los pilares verticales. En vez de utilizar uniones roblonadas o atornilladas mediante solape de chapas, como se hizo en los puentes americanos, las uniones se hacen a tope, rectificando mediante fresado el contacto de los distintos módulos que se van superponiendo, de forma que las compresiones se transmiten directamente de chapa a chapa; la unión entre ellas se hace mediante soldadura parcial de la junta. Así se han hecho las torres del puente Severn en Inglaterra y de los puentes del Bósforo en Estambul. Las torres no plantean problemas especiales de construcción, salvo la dificultad que supone elevar piezas o materiales a grandes alturas; las metálicas del puente Verrazano Narrows tienen una altura desde el nivel del mar de 210 m, y las de hormigón del puente Humber de 155 m. Las torres de los puentes metálicos se montan generalmente mediante grúas trepadoras ancladas a ellas, que se van elevando a la vez que van subiendo las torres. Las de los puentes de hormigón se construyen mediante encofrados trepadores, como en el puente de Tancarville, o mediante encofrados deslizantes, como en el puente Humber

El montaje del tablero se ha hecho en muchos de los grandes puentes colgantes por voladizos sucesivos, avanzando la ménsula desde una péndola a la siguiente, de la que se cuelga; el avance se hace simétricamente desde la torre hacia el centro del vano principal y hacia los extremos. Desde el propio tablero ya construido se van montando piezas más o menos grandes, elevándolas mediante grúas situados sobre él, hasta cerrar el tablero en el centro del vano. Así se construyó el puente George Washington, el Golden Gate y muchos de los puentes modernos japoneses. Otro sistema de montaje, que se ha utilizado en la mayoría de los últimos grandes puentes, y en todos los de sección en cajón, consiste en dividir el tablero en dovelas de sección completa que se llevan por flotación bajo su posición definitiva, y se elevan a ella desde los cables principales mediante cabrestantes; una vez situadas en su

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde



Posición definitiva se cuelgan de las péndolas. La secuencia de montaje en este caso es generalmente el inverso del anterior; se empiezan a colgar las dovelas centrales, y se avanza simétricamente hasta llegar a las torres. Así se construyó el puente doble de la Bahía de San Francisco, el Bay Bridge, terminado en 1936; el puente Verrazano Narrows en Nueva York; y los modernos: puente sobre el río Severn en Inglaterra, los puentes sobre el Bósforo en Estambul, y el puente sobre el estuario del Humber en Inglaterra.

1.3.6.- Puentes de pontones

Los puentes flotantes se apoyan sobre flotadores y por ello no tienen el arraigo en la tierra que toda obra fija debe tener. Los flotadores pueden ser más o menos grandes para reducir su movilidad y se puede conseguir que sus movimientos sean incluso menores que los de algunos puentes fijos, pero ello no elimina ese carácter de elemento flotante sometido a los movimientos del agua; hay siempre un movimiento relativo entre el puente y los apoyos fijos de las orillas.

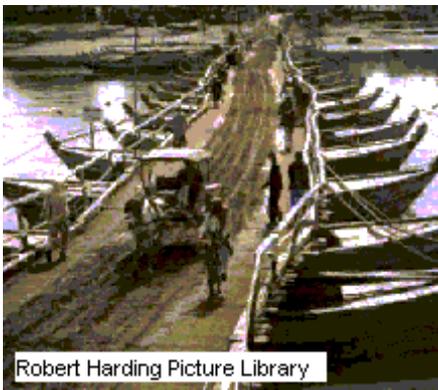
Los puentes flotantes consisten básicamente en un tablero apoyado sobre una serie de elementos flotantes que sirven para mantenerlo en una situación más o menos fija. Se han utilizado muchos tipos de elementos flotantes: barriles, odres, barcas, y pontones cerrados de diferentes materiales.

La mayoría de los puentes flotantes que se hicieron hasta el s. XIX se apoyaban en barcas fijas, análogas a las móviles, ancladas al lecho del río. Muchos de ellos, al estar situados en ríos navegables o en rías, debían permitir el paso de los barcos, y por ello tenían un tramo móvil; éste consistía en una serie de barcas sin anclar que se podían desplazar con su parte del tablero, dejando el puente abierto. Una vez que habían pasado los barcos, se volvían a llevar a su sitio enclavando el tablero a las barcas adyacentes fijas. Eran por tanto doblemente heteróclitos: flotantes y móviles.

El puente de Triana sobre el río Guadalquivir en Sevilla duró más de setecientos años, desde que lo construyeron los árabes en el siglo XII, hasta que se sustituyó a mediados del s. XIX

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

por un puente metálico fijo. Se rompió en innumerables ocasiones a causa de las avenidas del río que se lo llevaban aguas abajo; una vez terminada la riada se recuperaba, se le subía por el río, y se le volvía a colocar en su lugar, arreglando las cadenas que unían las barcas y lo fijaban a las orillas. Uno de los problemas más difíciles de resolver en los puentes flotantes más difíciles de resolver en los puentes flotantes en su enlace con tierra, porque la mayoría de las aguas varían de nivel; en el mar por la carrera de marea, y en los ríos por su variación de caudal. Este enlace se resuelve de diferentes maneras:



- a) creando una zona de transición que, apoyada en tierra y en la primera barca, puede cambiar de inclinación.
- b) variando la cota de la calzada sobre los pontones.
- c) anclando mediante cables los flotadores al fondo, de forma que estos cables soporten la variación de fuerza ascendente de los flotadores al variar su altura sumergida, y los mantengan fijos.

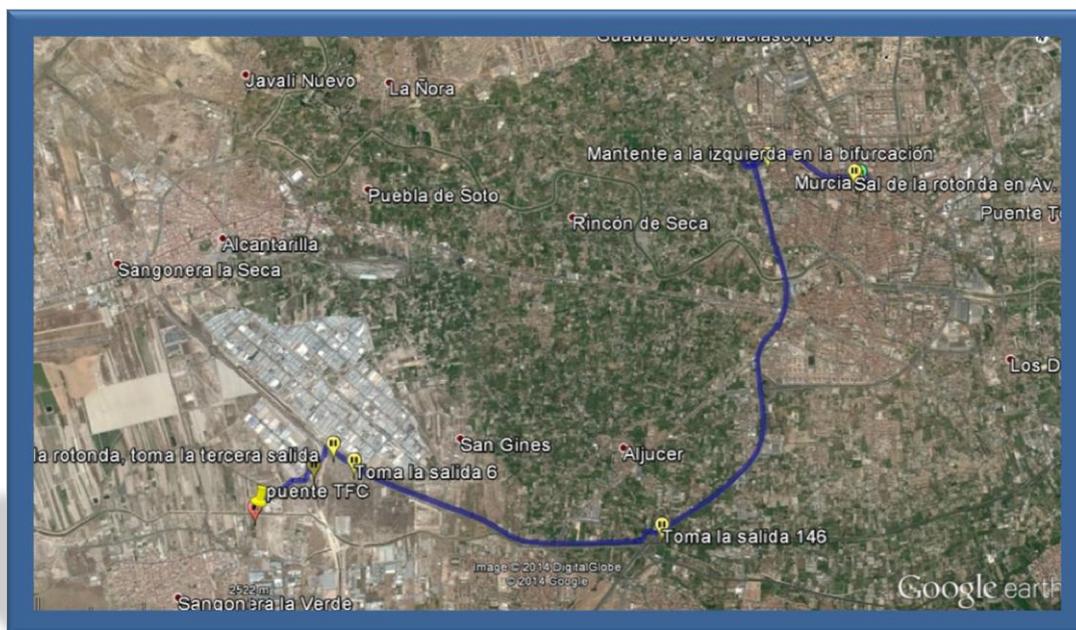
Los puentes flotantes modernos se hacen con pontones fijos formados por cajones cerrados con formas paralelepípedo o cilíndricas, que se fijan al fondo del agua mediante cables tensados, generalmente anclados a unos macizos apoyados en el fondo los sistemas de anclaje de los cables al fondo es uno de los problemas tecnológicos más complejos de estos puentes, problema que es común a todas las estructuras flotantes ancladas que se construyen: túneles flotantes, plataformas petrolíferas marinas, etc. Los pontones pueden estar semisumergidos totalmente; o sumergidos totalmente; pueden ser aislados, de forma que cada apoyo tenga su propio pontón, o se les puede dar continuidad, creando una unidad a lo largo de todo el puente; sobre este cajón continuo se pueden apoyar las pilas que soportan el tablero, o bien se puede utilizar su losa superior directamente de plataforma de la calzada los puentes de barcas eran de madera hasta el s. XIX; en este siglo se hicieron muchos puentes flotantes de hierro y acero, materiales que se empleaban tanto en los pontones como en el tablero.. En el s. XX se han hecho pontones de hormigón, inicialmente de hormigón armado y después de hormigón pretensado. Recientemente se han construido varios puentes flotantes, principalmente en Estados Unidos y en los fiordos noruegos (Bergsoysund). Ello ha dado lugar a estudios de gran envergadura sobre el comportamiento

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

dinámico de los puentes flotantes a los efectos del movimiento del agua, fundamentalmente del oleaje.

1.4.-Emplazamiento

El proyecto a realizar lo haremos respecto al Puente de la avenida de sangonera verde, el cual se encuentra a 1,5 kms. De la autovía Mu-30, salida 6 “Sangonera la verde”.



Sangonera la verde se encuentra a 13,1kms. De Murcia capital.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

El puente antes citado es el siguiente:



CAPITULO 2

FOTOGRAMETRÍA.

CONCEPTOS

BÁSICOS

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

2.1.- Introducción.

Para un mejor entendimiento sobre los conceptos que vamos a utilizar para llevar a cabo este proyecto, tenemos que abordar unos temas que veremos a continuación.

2.2.- Fotogrametría.

La palabra “fotogrametría” deriva de los vocablos “fotograma” y “metrón”. El primero, tiene a su vez su origen en “phos, photós”, luz, y “gramma”, que significa trazado o dibujo, mientras el significado del último, “metrón”, es medir. Así, según su etimología más literal, fotogrametría es “**la medida de lo dibujado con luz**”. Refinando esto y entendiendo “fotograma” como un todo, ya disponible, como bien pudiera ser una imagen fotográfica, fotogrametría es entonces algo parecido a “**medir sobre fotografías**” usando un lenguaje más cercano.

La actual Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS), anteriormente Sociedad Americana de Fotogrametría (ASP) a secas, va más allá y define fotogrametría como: “... arte, ciencia y tecnología de obtener información fiel acerca de objetos físicos y su entorno a través de procesos de grabación, medición e interpretación de imágenes fotográficas y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos”.

De la anterior definición, más completa, podemos diferenciar dos grandes ámbitos:

La fotogrametría métrica, la que a nosotros nos ocupa y en la que nos centraremos en lo sucesivo, y la fotogrametría interpretativa, cuyo cometido es el de reconocer o identificar objetos y sus significados tras un detallado análisis de las imágenes fotográficas, de infrarrojos, o de radares, entre otros.

Mediante la fotogrametría métrica, por su parte, se obtiene información cuantitativa bidimensional y tridimensional a partir de unas imágenes fotográficas sobre las que se realizan mediciones precisas, localizando puntos de interés de la forma más exacta posible logrando, finalmente, planos topográficos. [Universidad Pública de Navarra 2004].

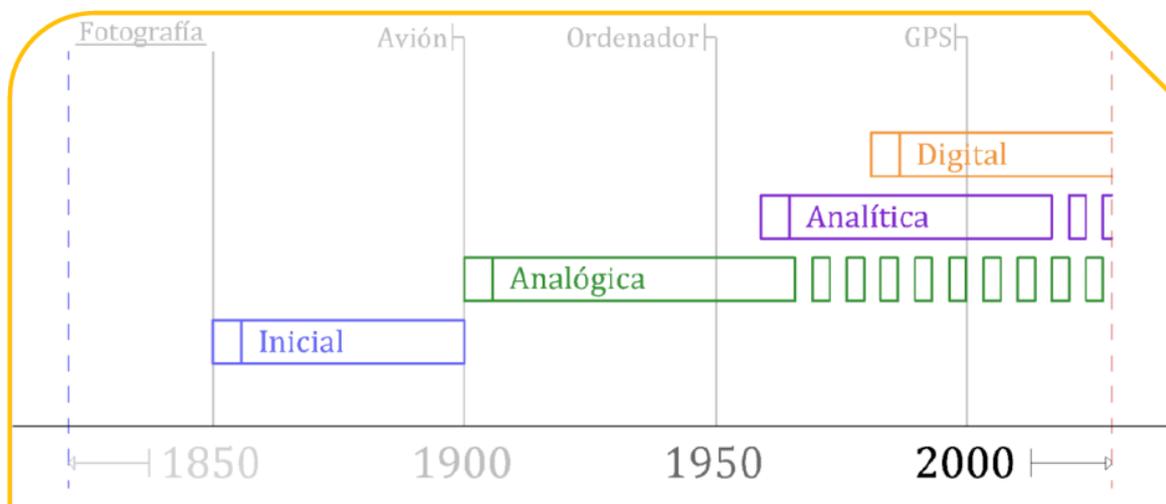
Dicho de una forma aún más práctica; se estudian las tareas relacionadas con la medición de magnitudes puntuales, lineales e incluso superficiales, así como la reconstrucción espacial de objetos u otras superficies. En los últimos años, y debido entre otros a la evolución

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

de la era digital, la fotogrametría métrica se encarga de generar imágenes corregidas de distorsión y en proyección, aptas para múltiples usos, sean o no cartográficos; cualquier producción multimedia, animación fotorrealista o estudio medioambiental puede ser un buen ejemplo. Nuestro proyecto, fundamentado en este tipo de fotogrametría, la métrica, es otro ejemplo de uso no cartográfico; el levantamiento arquitectónico. [Lerma García, 2002]

2.3. LA FOTOGRAMETRÍA EN EL TIEMPO

La fotogrametría, como cualquier ciencia, disciplina, arte u otro grupo en que se pueda incluir, ha sufrido y sigue sufriendo una constante evolución, acentuada aún más si cabe con el auge de las tecnologías de la información, especialmente internet. Hoy día, en plena era digital, la fotogrametría y el tratamiento de imágenes se utilizan de manera habitual y accesible. Sin embargo, el camino recorrido ha sido largo y en él, podemos discernir diferentes etapas estas:



2.3.1 Etapa pre-inicial

En el año 350 a.C. Aristóteles ya hizo alguna referencia al proceso de proyección óptica de las imágenes, pero fue a principios del siglo XVII cuando Girard Desargues comenzó a tratar el tema a fondo publicando en 1636 su primer libro, con el objeto de racionalizar la geometría proyectiva. [Lerma García, 2002]

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Tras ello, la primera noticia que se tiene del empleo de perspectivas con fines cartográficos proviene de 1725. En ese año, M.A.Capeller, en Suiza, había cartografiado el monte Pilatus utilizando un procedimiento similar al método de intersecciones de la Topografía. Las perspectivas usadas, al no existir aún la fotografía como tal, habían sido construidas con un procedimiento ideado por el pintor alemán Alberto Durero, en el siglo XVI. Esas perspectivas, como es de imaginar, presentaban una serie de problemas al intentar usarlas con fines cartográficos, y Capeller no pudo jamás obtener unas precisiones adecuadas. Su idea entonces cayó en saco roto y no se generalizó. [Juliá, 2002]

Aún así, unos años más tarde, el matemático alemán Johann Heinrich Lambert, publicó en Zurich en 1759 “Freye Perspective”, “perspectiva libre” en castellano. En este texto se sugería que los principios de la perspectiva se podrían utilizar para la obtención de planos y mapas, tal y como hizo en cierto modo, Capeller. Con todo, no se daría un desarrollo considerable hasta la irrupción de la fotografía. [Lerma García, 2002]

2.3.2 Etapa inicial

El origen de la fotogrametría como la conocemos hoy día se remonta a 1849, cuando bajo la dirección del Coronel del Cuerpo de Ingenieros de la Armada Francesa Aimé Laussedat (Ilustración 2.6), se realizan los primeros experimentos reales para general cartografía utilizando técnicas de fotogrametría terrestre, pues entre algunos de sus experimentos figuran lanzamientos al aire de cometas y globos para obtener fotografías aéreas, pero debido a las dificultades con las que se encontró, hubo de centrarse en las tareas a pie de campo. Fue necesario esperar al desarrollo de la aviación, a principios del siglo XX, para trabajar adecuadamente con fotografías aéreas. [Lerma García, 2002]

Tras una década de experimentos y estudios, en 1859, Laussedat, con la ayuda de una conocida casa de óptica de París, pudo construir un prototipo de lo que más tarde, en 1867, sería el fototeodolito (Ilustración 2.7). En una ponencia en la Academia Francesa, anunció el uso del fototeodolito para topografía y explicó el método de determinación de coordenadas objeto, utilizando para ello la intersección espacial de rayos a partir de un par de fotografías. Laussedat bautizaría el procedimiento como metro fotografía, considerada por muchos como

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

la “primera fotogrametría”. Por ello, por su trabajo pionero y dedicación, se considera “Padre de la Fotogrametría” a Aimé Laussedat.

Por la misma época, el arquitecto alemán Albrecht Meydenbauer (Ilustración 2.8) comenzó a utilizar el método de intersección a partir de fotografías para lograr levantamientos de edificios y monumentos, acuñando entonces el término que perdura hasta el presente, “fotogrametría”. [Juliá, 2002] Fue ya en 1867 cuando Meydenbauer completó el primer registro fotogramétrico de un monumento arquitectónico y, en 1885 cuando el alemán fundó el primer instituto fotogramétrico, denominado Royal Prussian Photogrammetric Institute, desde el que se realizó una gran labor de documentación de iglesias y edificios históricos con cuyos datos se están reconstruyendo edificios destruidos durante la Segunda Guerra Mundial. [Lerma García, 2002]

Si bien los procedimientos de Laussedat y Meydenbauer significaban todo un adelanto, ambos chocaban en algún momento con un grave problema: la identificación de un mismo punto en dos fotografías. En el caso de los edificios que relevaba Meydenbauer este inconveniente no era tan grave por la gran cantidad de puntos fácilmente reconocibles, pero, sin embargo, en el caso de intentar un trabajo fotogramétrico de un paisaje rural se entraba en serias y obvias dificultades. Además, el dibujo de los rasgos cartográficos debía hacerse punto a punto con la consiguiente demora en el tiempo. [Juliá, 2002]

Mientras tanto, las mejoras en la instrumentación seguían produciéndose, especialmente en el campo de la fotografía, pues en 1861 se realizó el primer proceso fotográfico, algo precario, con tres colores, y 30 años después, sobre 1891, la película de gelatina fue perfeccionada logrando el primer carrete flexible. Sin embargo, no sería hasta 1901 cuando se lograría un avance determinante para la fotogrametría. [Lerma García, 2002]

2.3.3. Etapa analógica

Y es que en ese año, en 1901, la dificultad planteada por la identificación de puntos homólogos pudo ser resuelta de manera radical por el físico alemán Carl Pulfrich (Ilustración 2.9) mediante la introducción del empleo de la visión y medición estereoscópicas, conocida ya en 1892 la propuesta de Stolze, que mediante la “marca flotante” consiguió desplazar micrométricamente cuadrículas sobre fotografías estereoscópicas, logrando de esta manera que la imagen fusionada estereoscópicamente de las dos cuadrículas se percibiese como

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

moviéndose en profundidad, en esencia, lo que hoy día podemos disfrutar en las salas de cine 3d digital. El instrumento construido por Zeiss en 1901 según esos principios es el estereocomparador de Pulfrich (Ilustración 2.10). [Juliá, 2002]

Este instrumento, al eliminar el problema de la identificación de puntos homólogos, y permitir la medición de coordenadas y paralajes con alta precisión, marcó uno de los hitos fundamentales de la historia de la fotogrametría, y fue, para muchos, una llegada muy oportuna, pues se llegó a decir que “la fotogrametría se encontraba en situación desesperada”. Desde el instante de su creación este instrumento encontró amplia aceptación y se constituyó en la piedra angular de innumerables innovaciones.

En el estereocomparador se procesaban fotogramas terrestres tomados con los ejes de ambas cámaras paralelos entre sí y perpendiculares a la base o, en todo caso, con una cierta desviación sobre la ortogonal a la misma manteniendo la condición de paralelismo entre ambos ejes. En estas situaciones, las coordenadas en el espacio de un punto se obtenían a partir de fórmulas sencillas y, de ahí en adelante, el dibujo del mapa se hacía de la misma manera que si esos puntos hubieran sido obtenidos por procedimientos topográficos; con una buena cantidad de puntos aislados, convenientemente elegidos y volcados sobre el papel, se interpolaban las curvas de nivel y demás rasgos cartográficos. [Juliá, 2002]

Como hemos dicho, el gran avance que significó el estereocomparador de Pulfrich no permaneció estático, sino que en realidad, él mismo era toda una invitación a ser perfeccionado, estudiado y finalmente convertido en un instrumento que superara los inconvenientes derivados del lento y tedioso dibujo punto por punto. La tarea no parecía difícil; era sólo cuestión de transmitir adecuadamente por algún dispositivo mecánico los movimientos de las fotografías. La idea de reemplazar los rayos ópticos por regletas mecánicas y de colocar un lápiz en su intersección, o en otro punto equivalente a ésta, no tardó en llegar. [Juliá, 2002]

Así, en el año 1914, de nuevo con la casa Zeiss de por medio, se pudo construir con todo éxito el aparato diseñado por el austriaco Eduard Ritter Von Orel (Ilustración 2.12) entre 1908 y 1909, que iba a cambiar la fotogrametría de manera radical; el estereoautógrafo (Ilustración 2.13), construido sobre la base del estereocomparador de Carl Pulfrich, al que se acopló un

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

dispositivo de regletas mecánicas que transmiten los valores de las coordenadas de los puntos de los fotogramas. El lápiz, aunque no está colocado en la intersección misma de las regletas que materializan los rayos homólogos, dibujará la posición correcta del punto en el mapa, puesto que se mueve solidariamente con el puente de la base en un arreglo que incluye el artificio del paralelogramo construido por Zeiss. [Juliá, 2002]

Así, el estereoautógrafo de von Orel fue el primer aparato que permitía el trazado continuo de los rasgos cartográficos, especialmente relevante en el tratado de las curvas de nivel, lo cual posibilitaba una representación del relieve mucho más fiel que la brindada por los anteriores procedimientos de interpolación. Pero, además de todo esto, la velocidad con que podía cartografiarse el terreno, casi independientemente de su complejidad, colocaba a la nueva técnica fuera de toda comparación con la lenta y elevadamente costosa tarea topográfica tradicional. La euforia desatada por este acontecimiento fue de unas dimensiones desorbitadas y se aprecia en publicaciones de la época una evidente exageración: el empleo del adjetivo “automático” para calificar el procedimiento. [Juliá, 2002]

En realidad, la exageración incurrida en el uso del adjetivo “automático” es bastante comprensible, y perdonable, si se piensa en la enorme simplificación de las tareas cartográficas que posibilitaba el estereoautógrafo. Un trabajo que requería meses, o años, podía realizarse en pocas semanas. Los trabajos de campo quedaban reducidos a un mínimo, y la mayor parte de la tarea con la nueva técnica se llevaba a cabo por medio de operadores cómodamente sentados en una oficina. La producción cartográfica podía entonces incrementarse drásticamente convirtiéndose en una suerte de proceso industrial. Se empezaba a hablar de rendimientos, o productividad, de kilómetros cuadrados por día, o de, incluso, hectáreas por hora. [Juliá, 2002]

A todo esto, había que sumar la aparición de los aeroplanos con los prototipos de los hermanos Wright (Ilustraciones 2.14 y 2.15) en la primera década de 1900, permitiendo así el desarrollo de la moderna fotogrametría aérea con el consiguiente aumento en rentabilización de restitución de mapas topográficos. Por entonces, las fotos que se realizaban estaban limitadas generalmente a la fotogrametría terrestre, hasta que, por primera vez, se utilizó el avión para uso topográfico en 1913, extendiéndose su uso a niveles insospechados durante la Primera Guerra Mundial. Sin embargo, las condiciones de toma de imágenes de las capturas

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

aéreas aún eran precarias y las restituciones no terminaban de ser del todo buenas. **[Lerma García, 2002]**

Ya en 1915, el alemán Gasser (Ilustración 2.13) patentó el estereoprojector, un instrumento que mediante el uso de anáglifos, fue considerado como el primer aparato restituidor fiable apto para fotografías aéreas, y que daría posteriormente paso al restituidor “Multiplex”, instrumento que materializaría la aerotriangulación que Gasser y von Gruber propusieron como procedimiento para la concatenación de modelos. Entre las dos guerras mundiales, se utilizó en la producción masiva de mapas, gracias a la creación, tanto en América como en Europa, de nuevas empresas dedicadas a trabajos fotogramétricos. **[Lerma García, 2002]**

Así, la fotogrametría aérea empezaba a constituirse como uno de los inventos sin los que el ser humano no concebía su cotidianeidad y fue adquiriendo, con los aparatos restituidores analógicos, una rápida y formidable difusión. Y es que a pesar de su precio, en general elevado, las fábricas principalmente europeas los producían y comercializaban en gran número en todos los rincones del planeta. El camino abierto por el estereoautógrafo de von Orel en la fotogrametría terrestre se ensanchaba así de forma considerable y con él, la producción de mapas y planos de todo tipo se incrementó drásticamente. **[Juliá, 2002]**

La modalidad analógica llegó a calar profundamente en la fotogrametría hasta el punto de recrear cualquier proceso matemático con algún artilugio que permitiera hacer, y no calcular. En el esplendor de la etapa analógica llegó a surgir el lema: “Quien mucho calcula, piensa poco”, con lo que queda patente el fuerte arraigo de los procedimientos analógico-mecánicos por la época, aún incluso cuando las primeras computadoras, si bien incipientes, eran ya una realidad. **[Juliá, 2002]**

En otro orden de cosas, ya en 1950, Russell Bean del “U.S. Geological Survey” empezó a desarrollar un aparato para producir ortofotos, finalizando su labor con la invención del instrumento “Orthophotoscope”, “Ortofoscopio” en castellano. Se empezó a comercializar en 1953 y fue mejorado en versiones sucesivas. Este instrumento se utilizó por el citado organismo para la confección de ortofotografías a partir de fotogramas aéreos, con lo que se ampliaban las posibilidades que la fotogrametría brindaba. **[Lerma García, 2002]**

No obstante, el auge de la informática induciría una nueva etapa en el transcurrir de la fotogrametría, la analítica.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

2.3.4. Etapa analítica

Con el advenimiento de la computación y la informática, el pensamiento analógicomecánico con el que eliminar cualquier cálculo por pequeño que fuera, pierde toda su vigencia. Parece irracional pensar mantener un arte basado en la eliminación de los cálculos cuando las computadoras empiezan a permitir hacerlos a altísimas velocidades.

Así, se empiezan a desarrollar métodos matemáticos llenos de cálculo y ecuaciones que, asistidas por los ordenadores, serán resueltas. [Juliá, 2002]

En 1953, Hellmut Schmid (Ilustración 2.16), profesor de fotogrametría en el “Swiss Federal Institute of Technology Zurich” en Suiza, desarrolló los principios de la fotogrametría analítica moderna usando notaciones matriciales y soluciones mínimo cuadráticas para el cálculo simultáneo de un gran número de fotografías con un completo estudio de propagación de errores, algo realmente complejo y tedioso para llevar a cabo sin informática de por medio, pero que por el desarrollo de la época pudo salir poco a poco adelante. Unos años después, ya en 1957, el ingeniero geodesta finlandés Uki Vilho Helava (Ilustración 2.17) inventó el restituidor analítico, lo que acabaría por sentar las bases de una nueva era en la relativamente corta vida de la fotogrametría. [Lerma García, 2002]

Sin embargo y lejos de lo que cabe pensar, la transición desde la fotogrametría analógica hasta la analítica fue particularmente lenta. Durante muchos años coexistieron tanto procedimientos analógicos como analíticos, pues, entre otras cosas, hasta 1964 no se terminó de materializar el genial restituidor analítico de Helava, cuyo costo además fue prohibitivo hasta entrados ya los años 80, cuando los precios de los restituidores analíticos comenzaron a equipararse por fin al desembolso que habría de realizarse por la adquisición de uno de los analógicos. [Juliá, 2002]

El restituidor analítico (Ilustración 2.18), al no depender de dispositivos ópticos o mecánicos para la formación del modelo, trajo una sensible mejora en la precisión y, además, posibilitó el empleo de cualquier tipo de fotografía, o incluso, de imágenes no fotográficas. Otra ventaja importante resultó ser la facilidad con que podían corregir errores sistemáticos, y no los puntuales, como la distorsión de la lente, las variaciones dimensionales de la película y los efectos de la refracción atmosférica y curvatura terrestre, errores que habremos de subsanar más adelante nosotros en nuestro trabajo desarrollado de un puente ubicado en sangonera la

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

verde. No menos importante que lo anterior fue la posibilidad de emplear altas redundancias con un tratamiento según mínimos cuadrados y un número elevado de iteraciones. [Juliá, 2002]

Como hemos dicho y a pesar de todo, los restituidores analógicos no cedieron mansamente el paso a los analíticos de costo mayor, aunque para ello debieron sacrificar en buena parte su esencia y someterse a un proceso de computarización o informatización, logrando así ser transformados en una especie de restituidor “híbrido”.

Este proceso consistía en adaptar unos sensores a los dispositivos mecánicos de los restituidores analógicos, que captaban las tres coordenadas del modelo y las enviaban a una computadora, con lo cual era posible almacenar el mapa en formato digital a través de un sistema CAD. El resultado obtenido era idéntico al que se lograría con un restituidor analógico puro, pero en lugar de plasmar el resultado en un papel, se computariza. De esta manera, la gran cantidad de aparatos analógicos esparcida por todo el mundo pudo ser de alguna manera reciclada, prolongando su vida útil por varios años más. [Juliá, 2002]

Es posible que muchos de esos aparatos se encuentren hoy, en plena era de la fotogrametría digital, todavía en uso.

2.3.5. Etapa digital

En esta última etapa en que dividimos la historia de la fotogrametría, se produce la transición desde los procedimientos analíticos a los digitales.

La fotogrametría digital como tal, comienza a desarrollarse cuando las fotografías pueden digitalizarse mediante un escáner (Ilustración 2.19), y evoluciona hasta el momento actual, en el que podemos tomar miles de imágenes mediante sensores fotosensibles CCD (Charged Coupled Device) (Ilustración 2.20), como el de nuestra Nikon Así, el arrollador desarrollo de la informática, especialmente a partir de 1980, que hizo posible a un costo razonable el almacenamiento de grandes cantidades de datos y la reducción de los tiempos de procesamiento a valores increíblemente pequeños, sumado además a la evolución y avances en microelectrónica y semiconductores que permitieron un auge disparatado de los dispositivos de adquisición de imagen digital, trajo como consecuencia la irrupción, para

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

quedarse, de los procedimientos digitales en fotogrametría. Pero no todo fue coser y cantar. [Juliá, 2002]

Si bien estos procedimientos eran de uso corriente en teledetección desde 1970, la fotogrametría se había mantenido casi impermeable a ellos hasta bien entrada la década del 80. El fuerte contraste entre el tamaño de un píxel en el terreno, del orden de un hectómetro, que ofrecía la teledetección, y las precisiones centimétricas de la posición de un punto en el terreno que la fotogrametría obtenía de manera rutinaria relegaban a lo digital a un segundo plano. [Juliá, 2002]

No obstante, la barrera existente entre los procedimientos digitales y la fotogrametría comenzó a perforarse a partir de los años 90 dando comienzo a una transición que, como todas, no resultó demasiado agresiva al principio. Con todo, en 1988 se presentó en el XVI Congreso de la ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) en Kyoto, la primera estación fotogramétrica digital comercial: la Kern DSP-1, si bien los nuevos procedimientos estaban muy influenciados por la tecnología anterior y se tenía la idea de que un restituidor digital no difería lo suficiente de un restituidor analítico. [Lerma García, 2002]

Sin embargo, pronto se comenzó a advertir las grandes posibilidades del tratamiento digital y aquella agresividad de la que hablábamos no tardó en aparecer. Como curiosidad, en 1988 Helava sostenía que “En fotogrametría digital, la operación manual es la antítesis de la eficiencia; ella debe ser evitada”.

Y ese fue el camino seguido; en los últimos años, el avance de los procedimientos digitales ha sido considerable, y se ha conseguido la correspondencia automática de imágenes con precisiones subpixel, con lo cual varias tareas fotogramétricas como las orientaciones, la rectificación, la confección de la ortofoto, o la aerotriangulación, se agilizan más que notablemente y podrían llevarse a cabo casi sin participación de un operador humano. [Juliá, 2002]

En otro orden de cosas, y ante la dificultad de montar cámaras digitales en aeronaves, la fotogrametría ha venido empleando hasta ahora un procedimiento híbrido, basado en la obtención de fotografías con la cámara analógica tradicional y en una posterior digitalización mediante escáneres de alta precisión. Sin embargo, en estos últimos años se han producido, y se producen, grandes avances en la construcción de estas cámaras digitales, llegando a rayar

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

en una calidad de imagen y precisión similar, e incluso superior, a la de las cámaras aéreas tradicionales. [Juliá, 2002]

Otra circunstancia muy interesante que ha aparecido en esta etapa digital es la amplia participación de las universidades, de numerosos equipos de trabajo, y de un gran abanico de agrupaciones que participan activamente en el desarrollo y mejora de la fotogrametría actual, dadas sus posibilidades a bajo coste y gracias a la era de la información en la que todo es accesible desde casi cualquier lugar del mundo.

2.4. LAS APLICACIONES DE LA FOTOGRAMETRIA

La fotogrametría ha resultado para la cartografía del último siglo una de sus principales herramientas, primordial diríamos; la necesidad de disponer de mapas o planos es muy diversa tanto en lo que respecta a fines militares y civiles como administrativos y privados y, en todo caso, de una necesidad vital. Así, junto con la topografía, han posibilitado de manera eficaz el mayor y mejor conocimiento de nuestro planeta, contribuyendo de este modo en el desarrollo de muchas disciplinas englobadas en lo que denominamos ciencias de la tierra y geodesia. Pero no es solamente en este campo donde la fotogrametría ha intervenido e interviene. [Orellana Ramírez 2006]

La fotogrametría, sobre todo en su vertiente terrestre, se impuso además en muchos otros campos de aplicación dando origen a lo que se denomina fotogrametría de objeto cercano o simplemente cercano. Algunas de sus aplicaciones son utilizadas en ingeniería civil, en hidráulica, en arqueología, o por ejemplo a nivel arquitectónico, como el trabajo que nos traemos entre manos. [Orellana Ramírez, 2006]

También se usa de manera específica en estudios de diversos fenómenos dinámicos que sufren una transformación rápida en el tiempo y/o en el espacio; estudios de corrientes líquidas o sólidas altamente inestables, como las olas o las dunas, así como estudios de deformaciones bruscas por choques o percusiones y, por ejemplo, estudios de movimiento astronómico y satelital. [Lerma García, 2002]

Además, las aplicaciones de la fotogrametría pueden llegar a ser muy variopintas, abandonando el carácter técnico y de ingeniería que se les asocia rápidamente y de manera casi involuntaria, pues son utilizadas en diversos campos que poco tienen, a priori, que ver

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

con aquellos conceptos, siendo en ocasiones una eficaz ayuda en medicina legal y criminalista, así como en investigaciones policíacas, en escultura y en cualquier otra disciplina que se auxilie de ella para la reproducción y medida de cuerpos y objeto diversos con cualquier fin y no solo el de levantamiento de edificios, estructuras, mapas o restos arqueológicos. Si bien esos son, entre otros, sus principales fines. Como curiosidad, cabe destacar que gracias a la fotogrametría se pudieron reconstruir muchos monumentos destruidos durante las guerras mundiales, entre ellos la célebre catedral de Reims.

2.5. TIPOS DE IMÁGENES

Describiremos ahora los tipos de toma fotográfica que podemos llevar a cabo en un trabajo fotogramétrico, así como los tipos de cámaras, digitales o no, por las que podemos optar, realizando también un breve acercamiento al mundo de los escáneres fotogramétricos con los que digitalizar imágenes analógicas previamente capturadas mediante cámaras convencionales.

2.5.1. Cámara fotográfica

La máquina utilizada para realizar las capturas necesarias para cualquier trabajo fotogramétrico puede ser tanto analógica como digital, si bien en nuestro caso optaremos por una cámara digital, una Samsung digital modelo Como diferencia primordial entre ambas sabemos que, mientras las cámaras analógicas utilizan como soporte una película fotográfica de gelatina especialmente diseñada (Imagen 2.21), las digitales hacen uso de unos elementos sensibles a la luz (Imagen 2.22) que permiten traducir directamente la imagen a un formato digital que detallaremos en adelante.



Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Entre tanto, las cámaras fotográficas pueden clasificarse según otros muchos aspectos. Sin embargo, parece conveniente hacer una división en grupos según los mecanismos de control de las distorsiones inducidas, que detallaremos en el apartado de calibración de la cámara, por la relevancia que éstas adquieren en fotogrametría. Así, las cámaras se pueden dividir en:

- **Cámaras métricas**

Este tipo de cámaras son aquellas para las que el fabricante realiza una calibración de precisión en laboratorio, normalmente por el método del multicolimador, y ofrece un certificado de los valores de la distorsión para unos ciertos valores de focal. Ello conlleva, además, la estabilidad total de los elementos ópticos de la cámara. Para el caso de las analógicas, se proyectan en el negativo un conjunto de marcas fiduciales que, representando el sistema de coordenadas de la imagen, garantizan la recuperación de la geometría interna de la toma. Ninguna cámara “autofoco” es, por definición, una cámara métrica.

[Arias Pérez et al., 2005]

- **Cámaras no métricas**

En este grupo congregamos aquellas cámaras cuya distorsión óptica no es conocida de antemano, esto es, no están calibradas, por lo que si queremos usarlas con fines fotogramétricos debemos recurrir a algún procedimiento de calibración adecuado según las precisiones requeridas y, sobre todo, los recursos de que dispongamos. Este es el caso en el que nos encontramos, pues nuestra cámara fotográfica es una máquina no concebida en su desarrollo para estos menesteres. En lo sucesivo veremos un método sencillo y económico de calibrar esta, nuestra cámara, con una precisión bastante aceptable mediante Photomodeler, el programa elegido para el desarrollo del proyecto.

El gran problema de estas cámaras es la falta de estabilidad del sistema objetivo, y con él, por tanto, la variabilidad de la focal, por lo que es conveniente realizar la calibración cada vez que se use y cambien las condiciones de la toma. De ahí que nosotros consideremos una única condición de toma para todo el levantamiento. Entraremos en detalle cuando hablemos de la calibración. [Arias Pérez et al., 2005]

• Cámaras Semimétricas

Las cámaras conocidas como semimétricas se sitúan en un camino intermedio entre las dos anteriores. Son máquinas más estables que las no métricas o amateur pues, partiendo de estas, se añade entre las lentes y el plano de la película, para el caso de las analógicas, una placa de vidrio reticulada llamada placa “réseau” con unas marcas fiduciales perfectamente conocidas, de manera que cada vez que se use la cámara se puedan utilizar estas marcas impresas en la película para determinar la posición del punto principal y la deformación del plano de la película, posibilitando la correcta realización del resto del proceso fotogramétrico. Para el caso de las cámaras digitales, es la misma placa del sensor la que, de tener la suficiente garantía de fabricación, puede interpretarse como una retícula formada por la matriz de píxeles de coordenadas imagen dadas por la fila y la columna de cada píxel. [Arias Pérez et al., 2005]

2.5.2. Digital o Analógico

Como podemos ir observando a lo largo de las páginas anteriores, la disputa entre ambas modalidades está servida, pues la alternativa a las cámaras analógicas convencionales son las cada vez más extendidas cámaras digitales, cuyo uso ha ido y va incrementando de manera paralela a la mejora de su calidad y resolución. Hay muchas diferencias entre las cámaras analógicas y las digitales, pero señalaremos tres de ellas:

1. En una cámara digital, la parte sensible no es una película fotográfica sino un conjunto estructurado de elementos dispuestos en forma matricial o lineal, sensible a la luz; un sensor CCD.
2. El procesado pasa de ser químico (revelado, baño de paro, fijado, lavado, secado y copiado) para las cámaras analógicas a ser electrónico (una transformación analógico-digital de la intensidad de luz a un valor numérico) en las cámaras digitales.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

3. En una máquina digital, el soporte ya no es, obviamente, la propia película fotográfica, sino un sistema de almacenamiento digital (disco óptico o magnético (Ilustración), tarjeta de memoria (Ilustración)).



Viendo estas tres claras diferencias, se vislumbran unas ventajas y unos inconvenientes a la hora de utilizar, con fines fotogramétricos, las cámaras y/o imágenes digitales en lugar de las analógicas. Las ventajas son realmente interesantes para cualquier ámbito de la fotografía, y por ende para cualquier campo fotogramétrico y pueden resumirse en los siguientes puntos:

- **Ventajas**

- Contamos con una disponibilidad inmediata de la imagen, lo que nos facilita entre otras cosas, poder observar y corregir errores y desechar capturas.
- La eliminación del, ahora sin sentido, proceso de revelado.
- Desaparecen los costes del material fotográfico y el costosísimo proceso de digitalización mediante escáner.
- Las imágenes digitales, por su soporte de almacenamiento carecen de los problemas derivados de la estabilidad dimensional que afecta a las imágenes analógicas cuando se modifican las condiciones medioambientales de su almacenamiento. Por otro lado, al no requerir la manipulación directa a la hora de ser utilizadas se elimina el deterioro producido por esta causa.
- Las imágenes digitales permiten una fácil duplicación y transmisión siendo únicamente necesario disponer de los medios informáticos apropiados.
- Las características de la imagen tales como brillo y contraste pueden ser modificadas mediante el empleo de técnicas de análisis de imágenes, con el objetivo de mejorar la calidad visual de la misma y así favorecer la interpretación o bien para poner de manifiesto algún tipo de característica de la imagen.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

- Los productos derivados del formato digital son fácilmente integrables en entornos tipo CAD o SIG.

- **Inconvenientes**

- Se trata de una técnica de muy reciente aparición, por lo que en muchos aspectos aún puede estar inmadura.

- Los sistemas de digitalización de imágenes analógicas de resoluciones extremas, los escáneres digitales especializados, aún son muy caros.

- La necesidad de almacenamiento es muy elevada para los niveles de precisión exigidos en fotogrametría aérea. Así, una imagen en blanco y negro de 23x23 cm digitalizada a una resolución suficiente, expresada como tamaño de píxel de 15 μ m, ocupa un espacio en disco superior a los 200 Mb (256 tonos de gris), habiendo que multiplicar por 3 esta cifra si el almacenamiento se realiza en color real (16.7 millones de colores). Teniendo entonces en cuenta que en un

- proyecto se manejan un número considerable de imágenes, los volúmenes de

- almacenamientos requeridos son importantes. En fotogrametría terrestre este

- punto es irrelevante, pues no necesitamos imágenes de tantísimo tamaño.

- Una cámara digital específica para fotogrametría aérea es aún de un precio mucho más elevado que una analógica. Al igual que el punto anterior, para fotogrametría terrestre esto no es un inconveniente.

- Las cámaras digitales para fotogrametría aérea poseen, de momento, menor resolución geométrica que las analógicas. De manera análoga al punto

- anterior, en fotogrametría terrestre esto no es un inconveniente.

- En fotogrametría aérea, es un gran inconveniente la necesidad de realizar un vuelo mucho más elevado que si dispusiéramos de una cámara analógica, ya que con las digitales se necesita un tiempo mayor para cada exposición. En fotogrametría terrestre esto es irrelevante.

2.5.3. De analógico a digital

A la hora de convertir la imagen analógica que quedó impresa en la película fotográfica durante el vuelo (como hemos comentado, este proceso es de utilización casi exclusiva para fotogrametría aérea) debemos contar con un escáner fotogramétrico plano de alta precisión y

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

estabilidad de imagen. Éstos, empezaron a aparecer en gran medida sobre el año 1991 y todavía hoy son aparatos a mejorar y desarrollar. Si bien son absolutamente imprescindibles en el flujo de trabajo de la fotogrametría digital (especialmente aérea). **[Universidad Pública de Navarra, 2004]**

Los escáneres van provistos de unos sensores CCD (al igual que las cámaras fotográficas digitales) en disposición lineal, que, moviéndose por encima de la imagen de forma continua y controlada, “traducen” esta al “idioma” digital. El proceso es lento y difícil, tanto que los aparatos incorporan un sistema propio de refrigeración para mitigar en la medida de lo posible el calentamiento producido por el mismo.

Así las cosas, y según algunos escritores, un escáner fotogramétrico debe cumplir tres condiciones fundamentales:

1. Su precisión geométrica debe ser superior a ± 2 micras, para que sea al menos equiparable a la obtenida en los procesos analíticos, y debe mantenerse en el tiempo por medio de sistemas de auto calibración y calibración exterior.
2. Su resolución debe ser de al menos 2540 dpi, es decir, 10 micras por pixel. No obstante, la elección de la resolución del escaneo vendrá dada por la ampliación de la fotografía original y por el detalle mínimo que se pretenda detectar. Así, las resoluciones más comúnmente utilizadas están entre 15 y 30 micras por pixel. Como ya hemos comentado atrás, unas resoluciones de tal calibre generan unos ficheros de grandísimo tamaño y, alcanzar las 10 micras en unas imágenes aéreas puede hacer que el tamaño de los ficheros imagen sean prácticamente inmanejables, hoy por hoy, para un proyecto de una entidad importante.
3. Por último, debe tener una alta capacidad radiométrica para reproducir así de manera precisa el color. Cada pixel debiera ser definido internamente por el escáner por al menos 10 bit, teniendo así 210 niveles de gris para imágenes en blanco y negro, y 210 niveles de rojo, verde y azul para imágenes a color.

No obstante, nos vemos casi obligados a realizar una pequeña introducción al concepto de imagen digital, y al de algunos de sus factores, que tanto se han repetido en estas últimas páginas.

2.6. PRINCIPIOS DE LA FOTOGRAMETRÍA

2.6.1.- Definición y evolución histórica

La *Fotogrametría* es la técnica que permite realizar mediciones a partir de fotografías. Se trata de una técnica de medición indirecta, ya que los trabajos fotogramétricos se efectúan sobre imágenes de los objetos y no sobre los objetos mismos.

La definición anterior puede resultar insuficiente. *W. Rüger* sugirió definirla como una técnica de medición indirecta que permite determinar el estado geométrico de un objeto, su variación con el tiempo y la distancia recorrida por el mismo.

Una vez obtenidas las fotos podemos llegar a tener información deseada de estas fotografías ya que para ello podemos hacer el efecto inverso de la toma de la fotografía para poder sacar la información como medidas y formas, a este método lo llamamos **restitución fotogramétrica**.

Los principios teóricos de la fotogrametría se enunciaron incluso antes del invento de la fotografía. Fue a partir del desarrollo de ésta cuando algunos técnicos se interesaron en la posibilidad de realizar mediciones sobre las imágenes fotográficas. Los primeros trabajos serios fueron llevados a cabo por Laussedat durante el siglo XIX. El principal inconveniente con el que se encontraba la fotogrametría en esta primera fase, denominada Fotogrametría ordinaria, radica en la dificultad de identificar un mismo punto en fotografías tomadas desde sitios distintos. Este problema no se resolvió de forma satisfactoria hasta que Terrero y Hauck desarrollaron el principio de los planos nucleares.

Un gran número de cálculos matriciales complicaban enormemente la labor de conseguir los resultados de la restitución fotográfica, hasta que en 1901 Pulfrich desarrolló el estereocomparador, con este desarrollo se hizo más fácil la detección del relieve de las fotografías pudiendo así encontrar las coordenadas y datos de interés en las fotografías.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

A partir de los años 60 los ordenadores han ido desarrollándose y a la vez abaratando los precios de los mismos para hacer a la fotogrametría un favor, esto desbancó al estereocomparador dando inicio así a la era digital.

Hacia 1990 se empieza a trabajar con imágenes digitales y estaciones fotogramétricas digitales. Esta nueva etapa supone un cambio sustancial en cuanto al soporte de la información, a los equipos empleados, a la posibilidad de automatizar procesos y al tipo de resultados obtenidos. Por tanto, muchos autores dividen la historia de la Fotogrametría en tres etapas:

-Fotogrametría analógica, hasta 1960 aproximadamente.

-Fotogrametría analítica, hasta 1990 aproximadamente.

-Fotogrametría digital.

2.6.2.- Fotogrametría aérea y fotogrametría terrestre. Aplicaciones

Desde el principio de la fotogrametría hasta la evolución de la aviación la fotogrametría fue principalmente terrestre con fotografías tomadas desde el suelo y con proyecciones horizontales, con la aviación llegó la fotogrametría aérea con fotografías tomadas desde el aire con planos prácticamente verticales.

la fotogrametría terrestre presenta grandes inconvenientes en este campo debido a la gran cantidad de zonas ocultas que quedan cuando el relieve es mínimamente accidentado o existe arbolado. Sin embargo, es muy adecuada para otras aplicaciones: fotogrametría de objeto cercano y micro fotogrametría.

El campo de aplicación de la fotogrametría es muy amplio. Como ejemplos de aplicaciones pueden citarse:

- Cartografía convencional a todas las escalas.
- Cartografía digital. Modelos digitales del terreno.
- Arquitectura, conservación y restauración de monumentos y obras de arte.
- Medicina.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

- Evolución espacial y temporal de masas líquidas y gaseosas.
- Balística.
- Investigaciones policíacas, accidentes, etc.
- Control de grandes taludes, movimientos sísmicos, etc.
- Fotogrametría industrial.

En general, las aplicaciones cartográficas son propias de la fotogrametría aérea mientras que las restantes aplicaciones se obtienen mediante fotogrametría terrestre. En ambos casos se emplean las mismas técnicas e incluso los mismos equipos de restitución. Por tanto, lo que sigue es válido tanto para fotogrametría aérea como para fotogrametría terrestre.

2.6.3.- FUNDAMENTOS DEL MÉTODO

2.6.3.1.- Proyección central y proyección ortogonal

Habitualmente interesará obtener un plano, es decir una proyección ortogonal, del terreno o del objeto fotografiado. Sin embargo, una fotografía es, en el caso ideal, una proyección central. La restitución fotogramétrica consistirá, por tanto, en transformar la proyección central de las fotografías en la proyección ortogonal que nos interesa.

En una proyección ortogonal las posiciones planimétricas de los puntos imagen son las mismas que las de los puntos del terreno original, ya que estos se proyectan perpendicularmente al plano de referencia.

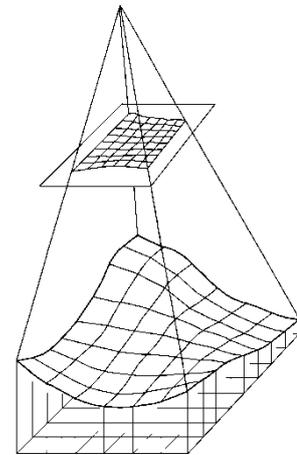


Fig. 20.1. Proyección central y proyección ortogonal

En la proyección central (figura 20.1) todos los rayos proyectivos pasan por el centro de proyección, que en una cámara fotográfica sería el objetivo, lo que hace que la imagen obtenida (fotografía) sea muy distinta a la que se habría obtenido con una proyección ortogonal.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Las diferencias entre los resultados de ambos tipos de proyección dependen de la forma del objeto fotografiado.

En efecto, un punto *A* como el de la figura 20.2 se representaría, en proyección central, en *a* y no en *a'* que es la representación de su proyección ortogonal sobre un plano horizontal de referencia. El resultado es que las imágenes de los puntos más próximos al objetivo se alejan del punto central de la proyección, mientras que las de los puntos más alejados del objetivo se acercan a dicho punto.

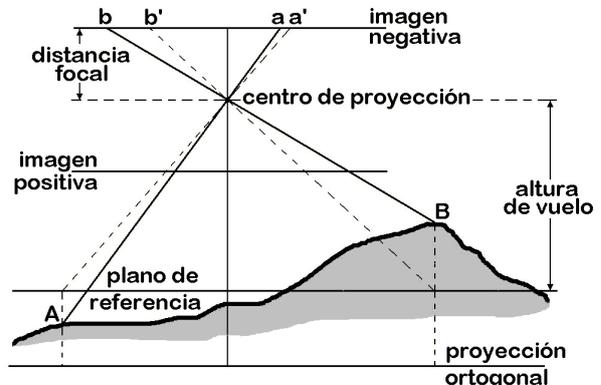


Fig. 20.2. Deformaciones en la imagen en la proyección central

Por otra parte, la escala en una fotografía no es uniforme. Las zonas más próximas al objetivo aparecen con una escala mayor y las más lejanas con una escala menor. En fotogrametría no se puede hablar de escala más que si nos referimos a la correspondiente a un plano de referencia.

El problema se complica si consideramos que, a menudo, el plano que contiene a la película fotográfica (negativo) no es paralelo a dicho plano de referencia. Esto es habitual en fotogrametría aérea, donde las oscilaciones del avión durante la toma de las fotografías impiden que el negativo ocupe una posición perfectamente horizontal. El efecto de la inclinación del eje de toma puede apreciarse en la figura 20.3 y viene a añadirse a las deformaciones propias de la proyección central, que ya se han comentado.

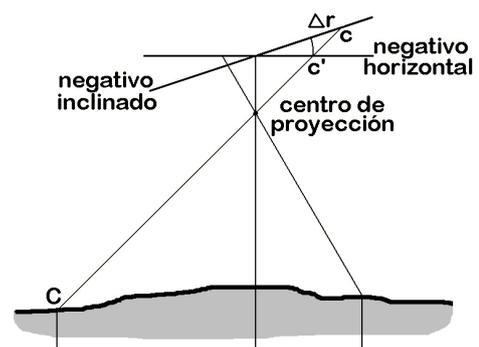


Fig. 20.3. Deformaciones en la imagen debidas a la inclinación del negativo

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

2.6.3.2.-Visión estereoscópica. Concepto de paralaje.

La visión estereoscópica es la propiedad de nuestra vista que nos permite determinar las posiciones relativas aproximadas de los objetos que estamos observando. Esto se consigue gracias a que el cerebro humano recibe una información visual tridimensional al ser capaz de combinar las imágenes distintas, debido a su diferente posición, que percibe cada uno de nuestros ojos.

Por la misma razón, si observamos dos fotografías de una misma zona pero tomadas desde puntos distintos podremos apreciar una imagen tridimensional de la zona común a las fotografías, siempre que observemos una de ellas con cada ojo y las fotografías se hayan situado previamente en posiciones geométricas similares a las que ocupaban los negativos en el momento de la toma (figura 20.4). Para facilitar la visión estereoscópica se utilizan estereoscopios, anáglifos (imágenes coloreadas) o luz polarizada.

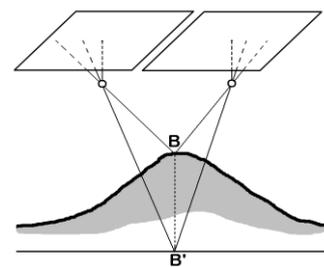


Fig. 20.4. Modelo estereoscópico

Puesto que las dos fotografías se habrán tomado desde sitios distintos, las posiciones de las imágenes de un punto dado en cada una de ellas serán distintas. La diferencia de posición de dos puntos homólogos en las dos fotografías se denomina paralaje (figura 20.5). En un vuelo fotogramétrico, en el que se van tomando fotografías del terreno sobrevolado a medida que el avión se desplaza, llamaremos eje X al paralelo a la dirección de vuelo y eje Y el eje horizontal perpendicular a ésta. De esta manera, la paralaje en el sentido Y (P_y) nos impediría la visión estereoscópica a menos que la eliminemos situando las fotografías de forma adecuada, mientras que la paralaje en el sentido X (P_x) nos permitirá determinar las altitudes de los puntos de las fotografías.

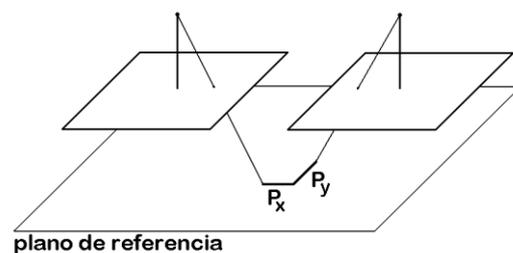


Fig. 20.5. Paralajes

2.6.3.3.- Método general de la fotogrametría

Los problemas planteados por la proyección central, y explicados en 20.2.1, quedarían resueltos si fuese posible reconstruir el modelo del terreno original a partir de una

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

fotografía aislada. Para ello sería preciso, en primer lugar, conocer la posición del punto central de la proyección (objetivo) y del plano de proyección (negativo) durante la toma. Uniendo el punto central con los distintos puntos de la fotografía reconstruimos el haz de rayos proyectivos pero, a partir de éste, no es posible conocer la posición de los puntos originales del terreno.

Además, como hemos visto, normalmente no se conoce en fotogrametría aérea la posición espacial exacta del plano de proyección con relación al centro de proyección. En este caso ni siquiera la posición del haz proyectivo puede ser reconstruida.

La solución a este problema viene del empleo de pares de fotogramas tomados desde puntos distintos pero cubriendo un área común. Situando adecuadamente los dos fotogramas que componen uno de estos pares, los dos rayos proyectivos (uno por cada fotograma) correspondientes a un punto determinado se cortarán

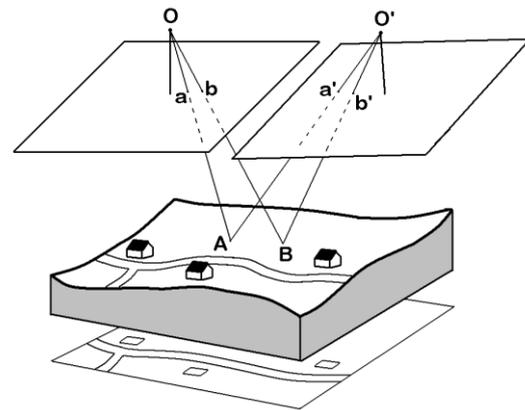


Fig. 20.6. Modelo estereoscópico

en un lugar del espacio, donde se formará una imagen de este punto. Estos rayos proyectivos se forman uniendo cada centro de proyección con el punto homólogo del fotograma correspondiente. Utilizando el par de fotogramas es posible crear un modelo estereoscópico (tridimensional) que reproduzca el terreno original (figura 20.6).

Sin embargo el resultado que obtendremos no será exactamente igual al original, ya que para que esto ocurra debemos de conocer algunos puntos de las fotografías conociendo fielmente su ubicación y orientación o lo que es lo mismo, conocer puntos dentro de las fotografías los cuales nos ayudaran a darle la orientación y fidelidad al terreno.

La observación del modelo estereoscópico puede hacerse gracias al *principio de la marca flotante*. Si se sitúan marcas (cruces, puntos luminosos, la punta de un estilete, etc.) sobre puntos homólogos de un par de fotogramas orientado, al observarlo estereoscópicamente dichas marcas aparecen como una sola apoyada sobre la imagen estereoscópica del punto. Se dice entonces que la marca está *posada* sobre el punto. Aumentando o disminuyendo la paralaje P_x de la marca ésta aparecerá como hundida en el terreno o flotando sobre él.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

2.6.3.4.- Fotografías y fotogramas. Definiciones geométricas

En fotogrametría se emplean las siguientes definiciones geométricas:

Punto principal.- Es la proyección ortogonal del centro de proyección (objetivo) sobre el plano de proyección (negativo). El punto principal ocupará la posición central en la fotografía.

Punto nadiral.- Intersección de la recta vertical que pasa por el centro de proyección con el plano de proyección. El punto nadiral es el punto de fuga de todas las rectas verticales en la proyección. Si el eje de toma es perfectamente vertical, negativo perfectamente horizontal, coincide con el punto principal.

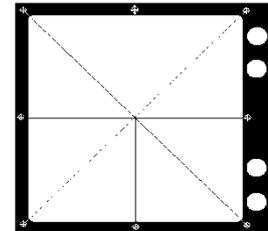


Fig. 20.7. Fotograma

Recta principal.- Recta que une el punto principal y el nadiral.

Distancia principal.- Distancia entre el centro de proyección y el punto principal. Equivale a la distancia focal de la cámara, ya que este tipo de fotografías siempre se enfoca al infinito.

Angulo de inclinación.- En fotografías aéreas, el ángulo que forma la dirección de la toma con la vertical.

En función del ángulo de inclinación existen tres tipos de fotografías aéreas:

- Verticales: Presentan una inclinación respecto a la vertical menor que 3° .
- Oblicuas: Inclinación mayor que 3° pero sin que en la fotografía aparezca el horizonte.
- Panorámicas: Fotografía en la que aparece el horizonte ($a < \gamma$).

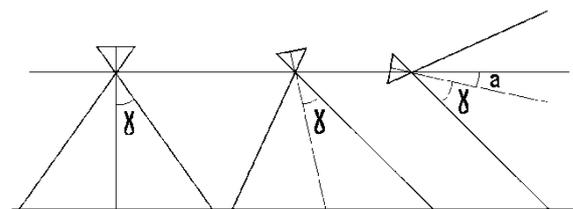


Fig. 20.8. Tipos de fotografías aéreas según la inclinación de la toma

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Llamamos *fotograma* a una fotografía en la que se conoce la posición del punto principal, la distancia focal y las deformaciones o distorsiones en la imagen propias de la cámara empleada. Los clisés utilizados en fotogrametría aérea (figura 20.9) llevan unas marcas en las cuatro esquinas llamadas *marcas fiduciarias*. Si unimos mediante rectas las marcas de esquinas opuestas, la intersección de las dos rectas nos determina el punto principal del fotograma. En fotogrametría terrestre las marcas se sitúan a mitad de los lados del fotograma, de forma que también nos permitan determinar la línea de horizonte. Las dimensiones más usuales de los fotogramas son $23 \times 23 \text{ cm}$ para aérea y $13 \times 18 \text{ cm}$ para terrestre.



Fig. 20.9. Fotograma

Además de las marcas fiduciarias, los fotogramas aéreos suelen llevar impresos en el borde los siguientes datos (figura 20.10):



Fig. 20.10. Información en el borde de un fotograma

- Nivel esférico, para conocer la inclinación aproximada del eje de toma
- Altimetro, para conocer la altitud aproximada en el momento de la toma
- Reloj, para conocer la hora de la toma
- Tipo y características de la cámara (distancia focal)
- Número de identificación

Las imágenes digitales se obtienen mediante sensores o digitalizando (mediante escaneado de alta resolución) imágenes analógicas. Se componen de *pixels* (*picture element* o *elemento de imagen*) y, al contener información numérica (figura 20.11).

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Pueden someterse a operaciones de filtrado, realzado, etc. Sobre este tipo de imágenes pueden, además, aplicarse algoritmos como los de identificación de puntos homólogos.

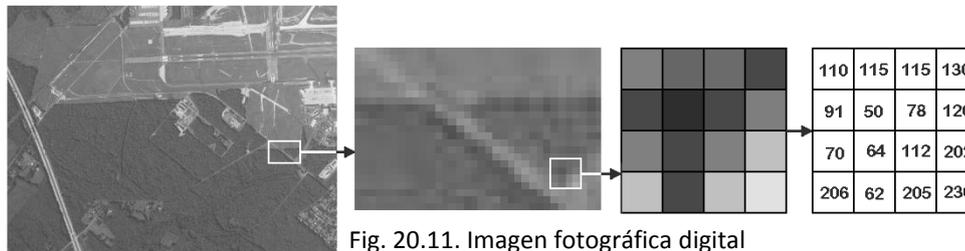


Fig. 20.11. Imagen fotográfica digital

2.6.4.- ORIENTACIÓN DE PARES DE FOTOGRAMAS

Se denomina orientación de un par de fotogramas a la operación consistente en situarlos en posiciones idénticas a las que ocupaban cuando fueron tomados, de manera que sea posible reconstruir completamente la proyección central. Las intersecciones en el espacio de los rayos proyectivos homólogos formarán un modelo tridimensional de la zona común a ambos fotogramas. Utilizando el equipo adecuado es posible restituir dicha zona a partir de la observación estereoscópica del modelo.

Mediante la orientación se establece una correspondencia entre los distintos sistemas de coordenadas que aparecen en el proceso fotogramétrico:

- **Coordenadas fotografía.-** Sistema de coordenadas planas X, Y con origen en el punto principal de la fotografía. El eje X sigue la dirección del vuelo y el Y es perpendicular a él.
- **Coordenadas modelo.-** Sistema tridimensional que corresponde al modelo estereoscópico obtenido tras orientar el par. Se toma como origen de coordenadas el centro de proyección del fotograma izquierdo, eje X según la dirección del vuelo y eje Z según la recta que une el centro de proyección y el punto principal del mismo fotograma.
- **Coordenadas terreno.-** El sistema de coordenadas (normalmente UTM) que se emplee para representar los resultados de la restitución fotogramétrica.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

La orientación puede hacerse por métodos mecánicos, normalmente a base de tanteos sistemáticos, o por métodos analíticos, calculando analíticamente la magnitud de las operaciones a efectuar. Con restituidores automáticos se empleaba el primer sistema; con los modernos restituidores apoyados en ordenadores el segundo sistema es el empleado.

2.6.4.1.- Orientación

Orientación interna. Para orientar un par de fotogramas debemos, en primer lugar, conocer las condiciones en que se realizó la proyección central, es decir la posición del punto principal en cada fotograma y la distancia principal (distancia focal) de la cámara. Estas condiciones se conocen como *parámetros de la orientación interna* y son características del tipo de cámara empleado. Se determinan mediante un proceso de calibración de la cámara

Conocidos los parámetros de la orientación interna, se puede reconstruir la forma de los haces de rayos proyectivos pero no sus posiciones en el espacio, por lo que aun no es posible formar el modelo estereoscópico.

Con restituidores digitales es posible incorporar correcciones para tener en cuenta las deformaciones debidas a la distorsión del objetivo de la cámara e incluso a la curvatura terrestre y la refracción atmosférica.

Orientación externa. Mediante la *orientación externa* se sitúa cada haz proyectivo en su posición correcta en el espacio, formando el modelo estereoscópico a escala del terreno original. La orientación externa queda definida por seis parámetros:

- La coordenadas X , Y y Z del punto nadiral del fotograma.
- Los ángulos de giro en cada una de las tres direcciones del espacio, ω , φ y κ , de la cámara en el momento de la toma.

La orientación externa tiene dos fases:
orientación relativa y *orientación absoluta*.

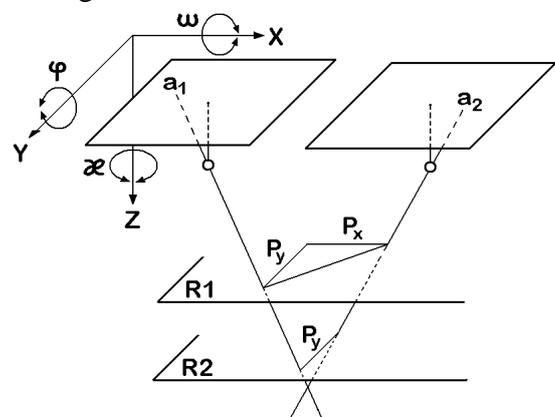


Fig. 20.12. Orientación relativa: paralelas

Orientación relativa. La primera etapa de la orientación externa se denomina orientación relativa y consiste en situar ambos haces proyectivos en la mis-

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

ma posición relativa que ocupaban los haces proyectivos originales. De esta forma, los dos fotogramas ocuparán, uno respecto al otro, posiciones semejantes a las que ocupaban los negativos cuando se efectuaron las tomas.

Una vez realizada la orientación relativa el modelo estereoscópico está formado y puede ser observado pero ni su situación en el espacio ni su escala son las correctas.

En equipos analógicos esta fase de la orientación se realiza eliminando paralajes P_y en cinco puntos representativos comunes a ambos fotogramas, más un sexto punto de control (figura 20.12). Como hemos visto, se llama paralaje al desplazamiento de la imagen de un punto en dos fotogramas sucesivos causado por el cambio de posición de la cámara de una toma a otra. El vector paralaje tiene dos componentes, tal como se aprecia en la figura 20.12: según la dirección del vuelo (que llamamos dirección X) y según la transversal (dirección Y). La paralaje P_x se anula colocando el plano de referencia R en la posición que correspondería al punto A del terreno (en la figura, la posición $R2$); la paralaje P_y es la que debe eliminarse durante la etapa de orientación relativa.

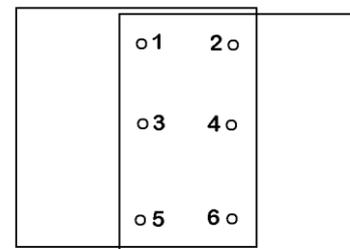


Fig. 20.13. Distribución aproximada de los puntos

Para asegurar que cada par de rayos homólogos se corta en un punto, se demuestra en Geometría Projectiva que basta con que lo hagan cinco de ellos. En consecuencia, para conseguir la orientación relativa deberían emplearse cinco puntos. Lo normal es utilizar seis o más puntos, bien repartidos por la zona común de ambos fotogramas (figura 20.13).

La operación se realiza colocando los fotogramas en dos proyectores, eligiendo los seis puntos y eliminando paralajes de forma sistemática hasta conseguir que no queden paralajes P_y en ninguno de los seis puntos y, por tanto, en ningún punto del modelo. Para eliminar paralajes se actúa

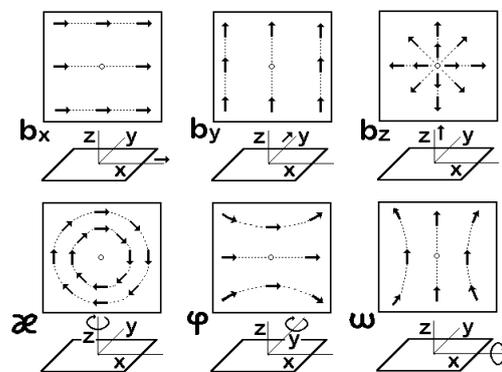


Fig. 20.14. Orientación relativa: los seis movimientos posibles

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

sobre cinco de los seis posibles movimientos en el espacio, tres lineales y tres angulares:

- b_x : Desplazamiento en el sentido de las X. Esta dirección es la definida por la recta que une los dos centros de proyección (en fotogrametría aérea, la dirección del vuelo).
- b_y : Desplazamiento en el sentido de las Y (transversal).
- b_z : Desplazamiento en el sentido de las Z (vertical).
- Giro en torno al eje X (ω).
- Giro en torno al eje Y (φ).
- Giro en torno al eje Z (α).

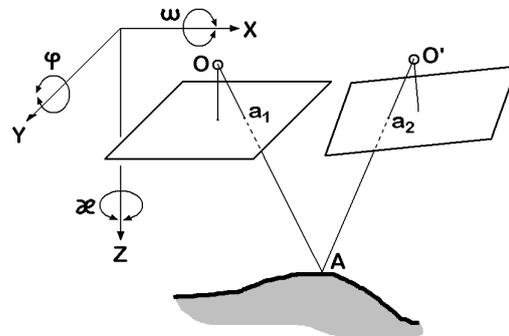


Fig. 20.15. Orientación relativa:
los tres giros posibles

En la figura 20.14 se aprecia el efecto provocado por cada uno de estos seis movimientos. En equipos analíticos y digitales la operación suele realizarse mediante un ajuste iterativo por mínimos cuadrados, imponiendo la condición de coplanariedad o la de colinearidad. La primera establece que un punto dado A del terreno, sus dos puntos homólogos a_1 y a_2 y los dos centros de proyección O y O' deben estar en un mismo plano. La segunda establece que un punto del terreno A, su punto imagen en una fotografía a_1 y el centro de proyección correspondiente O deben estar alineados.

Orientación absoluta. Puntos de apoyo. Una vez creado el modelo estereoscópico por intersección de los dos haces de rayos proyectivos (orientación relativa) es preciso situar dicho modelo, o lo que es lo mismo el bloque formado por los dos haces, en posición correcta con relación al terreno (figura 20.16).

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Para ello se necesita conocer, al menos, las coordenadas terreno X , Y y Z de dos puntos del terreno y la coordenada Z de un tercero. Estos puntos, llamados puntos de apoyo, deben aparecer en ambos fotogramas, estar claramente identificados y bien repartidos por toda la zona afectada y no estar alineados.

Normalmente, para disponer de información redundante que permita afinar más y comprobar posibles errores, se miden por

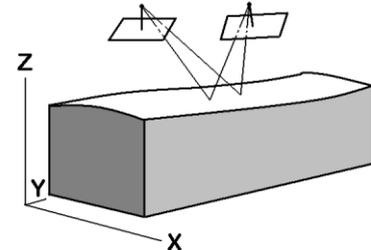
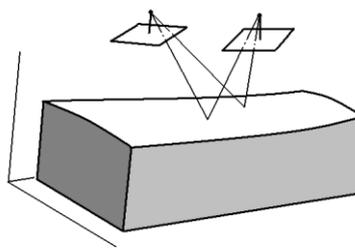


Fig. 20.16. Orientación absoluta

topografía clásica las coordenadas de, al menos, cuatro puntos de apoyo del terreno a restituir.

La primera operación a realizar es el *ajuste en escala*, para la cual es necesario conocer, al menos, la distancia entre dos de los puntos de apoyo obtenida a partir de sus coordenadas planimétricas. La escala se ajusta por movimiento de los proyectores en la dirección X , lo que no introduce paralajes P_y y no altera, por tanto, la orientación relativa.

La segunda operación consiste en ajustar el modelo hasta lograr su perfecta *nivelación*. Para ello se necesita conocer las coordenadas Z de, al menos, tres puntos no alineados del terreno. Esta fase se consigue actuando sobre los movimientos de giro sobre los ejes X e Y de los dos proyectores simultáneamente, de forma que la orientación relativa no sufre alteraciones.

Los equipos analíticos y digitales permiten resolver numéricamente y de forma conjunta las dos etapas de la orientación externa. Se pasa así directamente del sistema de coordenadas fotografía al sistema de coordenadas terreno sin pasar por el sistema de coordenadas modelo.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

2.6.5.- Puntos de apoyo. Concepto de aerotriangulación. GNSS aerotransportado

Uno de los principales inconvenientes de la fotogrametría radica en la necesidad de levantar una serie de puntos de apoyo mediante topografía clásica, lo que complica y encarece la operación. La fotogrametría no ha podido independizarse de la topografía tradicional, aunque sí se ha podido reducir el número de puntos de apoyo necesarios utilizando la técnica denominada *triangulación aérea* o *aerotriangulación*.

Consiste esta técnica en obtener gran parte de los puntos de apoyo por procedimientos fotogramétricos, reduciendo así el número de los que es necesario levantar topográficamente.

La aerotriangulación consiste en la obtención de las coordenadas X , Y y Z de puntos que aparecen en cada par fotogramétrico ya orientado para emplearlos como nuevos puntos de apoyo en los pares posteriores de una pasada. Existen distintos procedimientos para aplicarla y, en general, los equipos analíticos y digitales disponen de software que permite realizar conjuntamente los cálculos, el ajuste y la compensación de cada pasada del vuelo.

En los últimos años se han producido avances significativos en estas técnicas gracias a la incorporación de sistemas GNSS aerotransportados y sensores inerciales. Estos sistemas, instalados en el avión fotogramétrico, permiten determinar los parámetros de la orientación externa (normalmente las coordenadas del centro de proyección) con precisión decimétrica mediante observación cinemática relativa respecto a una estación fija en tierra. Las coordenadas medidas por el equipo GNSS se introducen en el ajuste de cada pasada.

2.6.6.- EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN

2.6.6.1.- Instrumentos empleados

Las cámaras de fotogrametría aérea se sitúan generalmente en el fondo del avión. Se trata de cámaras especiales, perfectamente calibradas y que utilizan sistemas neumáticos para garantizar que el negativo está completamente plano en el momento de la toma. Los movimientos de la película, la secuencia de disparos de la cámara, etc., están automatizados.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

La distancia focal y el campo de imagen en una cámara están relacionados. Pueden darse los siguientes casos:

	CAMPO (α)	FOCAL
Ángulo pequeño	60°	30 mm
Ángulo normal	80°	200mm
Gran angular	90°	150mm
Súper gran angular	120°	88mm

En fotogrametría aérea suelen emplearse objetivos granangulares.

Las cámaras clásicas para fotogrametría terrestre se montan sobre un teodolito o lo llevan incorporado en su estructura. De esta forma, los parámetros de la orientación externa se pueden determinar en el momento de la toma de los fotogramas. No obstante, es práctica habitual en la fotogrametría terrestre, como en la aérea, el empleo de puntos de apoyo lo que permite realizar la orientación con mayor precisión. En consecuencia, se están empleando cámaras mucho más sencillas, baratas y manejables, con la única condición de que se haya efectuado un calibrado cuidadoso previo de las mismas. Los parámetros de calibrado de cada cámara pueden introducirse en el ordenador y ser tenidos en cuenta a la hora de realizar una restitución analítica, eliminando los correspondientes errores.

Los sistemas de toma más modernos son los constituidos por sensores, que proporcionan directamente imágenes digitales. También es posible obtener este tipo de imágenes a partir de fotogramas mediante un escáner de alta resolución. Las imágenes digitales son la base de la fotogrametría digital y permiten obtener mejores resultados y automatizar procesos repetitivos.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Los restituidores automáticos (como el *WILD A8* de la figura 20.17) permitían pasar de la proyección central a la ortogonal simulando físicamente la doble proyección central del par fotogramétrico orientado. Esta simulación podía efectuarse por procedimientos ópticos, mecánicos u óptico-mecánicos, lo que dio lugar a los distintos tipos de restituidores automáticos. En todos los casos se trataba de instrumentos voluminosos y muy complicados desde el punto de vista de su fabricación y su mantenimiento. Presentaban además una serie de limitaciones mecánicas y la imposibilidad de integrarse adecuadamente en sistemas de trabajo topográfico y fotogramétrico informatizado. Eran, además, equipos muy caros.

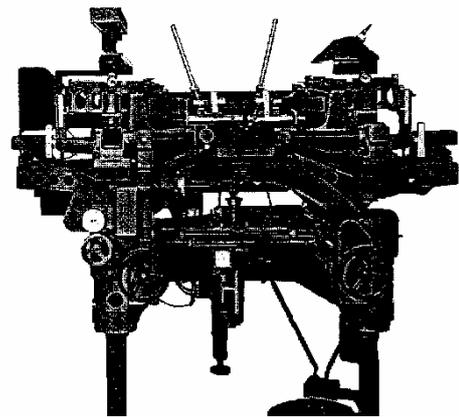


Fig. 20.17. Restituidor Wild A8

Los restituidores automáticos fueron sustituidos por los equipos analíticos, apoyados en un ordenador y mucho más sencillos desde el punto de vista mecánico. En ellos se emplean las técnicas de estereofotogrametría analítica y no las de simulación física: Todos los procesos se realizan a través del ordenador, que puede reconstruir la proyección central de forma totalmente numérica reproduciendo analíticamente las relaciones proyectivas entre los dos fotogramas. Por tanto, los movimientos de los sistemas de medición en equipos de este tipo, que deben corresponder a los movimientos en la proyección central que se pretende reconstruir, se calculan de forma analítica antes de enviar a los servomecanismos correspondientes las señales necesarias para ponerlos en práctica.



Fig. 20.18. Estación fotogramétrica digital

Los restituidores digitales, denominados estaciones fotogramétricas digitales (en la figura 20.18 el modelo *Delta* de Geosystem), se basan en un potente ordenador personal mediante el cual se realizan todas las funciones de los equipos clásicos, pero de forma totalmente digital. Las dos imágenes digitales del par fotogramétrico, obtenidas mediante

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

sensores o desde un escáner, se muestran simultáneamente en pantalla y el modelo estereoscópico se observa mediante anaglifos o luz polarizada. No se requieren sistemas ópticos o mecánicos ya que no es necesario desplazar físicamente los fotogramas al tratarse de imágenes digitales. Estos equipos están sustituyendo a los restituidores analíticos.

2.6.6.2.- Restitución de pares de fotogramas

Como se ha indicado, la restitución fotogramétrica consiste en la obtención de información métrica, mediante un equipo apropiado (un restituidor) a partir de un par de fotogramas previamente orientado en ese equipo. Las fases a seguir son:

1. Orientación interna: Formar los haces proyectivos a partir del conocimiento de los parámetros propios de la cámara.
2. Orientación relativa: Crear el modelo estereoscópico eliminando paralajes P_y .
3. Orientación absoluta: Con ayuda de los puntos de apoyo, situar correctamente el modelo en un sistema de coordenadas terreno y darle escala.
4. Restitución: Extraer información métrica del modelo.

La extracción de información se realiza a partir de la observación estereoscópica del modelo y con ayuda del índice móvil. En el caso de que se desee trazar curvas de nivel, basta con fijar la coordenada Z del índice móvil (o sea, su paralaje P_x) y moverlo sobre el modelo manteniéndolo posado. En otros casos se prefiere restituir por perfiles, fijando las coordenadas X o Y del índice.

El resultado de la restitución depende del tipo de restituidor que se emplee: en equipos antiguos se dibujaba directamente el plano o mapa con una mesa de dibujo o plotter, en los modernos equipos apoyados en un ordenador se almacenan los datos numéricos (coordenadas terreno) en soporte magnético para explotarlos posteriormente. Como se ha indicado, el empleo de restituidores de este tipo permite introducir una serie de correcciones que el ordenador aplicará a las coordenadas terreno calculadas. Es habitual considerar la corrección por curvatura terrestre y, en general, puede incluirse cualquier tipo de corrección que pueda ser expresada mediante ecuaciones.

Las estaciones fotogramétricas digitales incorporan módulos que permiten generar automáticamente modelos digitales de elevaciones (MDE).

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

2.6.6.3.- Automatización de procesos

El avance más relevante dentro de la fotogrametría digital es el constituido por la correlación automática de imágenes digitales ya que permite automatizar procesos, especialmente la obtención del modelo digital del terreno.

Si disponemos de un par de imágenes orientado, para determinar las coordenadas terreno de un punto de una imagen es suficiente con identificar su homólogo en la otra imagen del par. Esta tarea de identificación de puntos la realiza el operador del restituidor de una forma intuitiva pero es la que más tiempo consume en el proceso de restitución. Para automatizarla se emplean algoritmos de correlación, que realizan la comparación de una pequeña ventana (zona alrededor del punto considerado) en una imagen digital con las distintas posiciones posibles del punto homólogo en la otra imagen. Habitualmente se emplean dos o más algoritmos distintos para eliminar errores en la identificación de puntos homólogos.

El barrido sistemático del modelo, realizado por el ordenador, permitirá identificar los homólogos de una serie de puntos distribuidos regularmente. Se determinan así las coordenadas X, Y y Z de los puntos y se genera el modelo digital del terreno.

2.6.6.4.- Concepto de ortoproyección

La finalidad de la ortoproyección es la obtención de fotogramas métricos, es decir fotogramas que conserven las relaciones métricas de la figura original y cuya escala sea correcta y conocida. Se trata de transformar la proyección central fotográfica en una proyección ortogonal eliminando las deformaciones de la imagen propias de la primera. Un fotograma de este tipo complementa perfectamente a un plano ya que presenta una planimetría sin errores y además conserva todos los detalles de la fotografía, eliminando cualquier interpretación errónea por parte del usuario.

Entendemos por rectificación el proceso de transformación de una fotografía normal, con los errores propios de la proyección central que ya conocemos, en una fotografía métrica. El término ha quedado reducido a aquellas transformaciones que corrigen únicamente el error de inclinación de la cámara y no los debidos a la forma del objeto fotografiado. Debido a la superposición en cada zona del fotograma de deformaciones de diversa índole (y básicamente debido a las deformaciones por relieve) la ortoproyección debe realizarse de forma diferencial, es

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

decir con parámetros distintos para cada pequeña zona de la foto. En la práctica esto se realiza de forma automática con equipos conectados a ordenadores.

En este caso ya no basta con cuatro puntos de apoyo para ligar el par fotogramétrico al terreno si no que es preciso crear un modelo digital del terreno objeto de la ortoproyección. A partir de este modelo el ordenador calcula los parámetros de la ortoproyección en cada pequeña zona del fotograma. Para obtener el modelo digital puede realizarse una restitución analítica a base de perfiles paralelos y equidistantes, aunque con el software adecuado es posible crearlo con otros procedimientos.

Un ortoprojector clásico consiste, básicamente, en una base para situar la nueva emulsión a impresionar (normalmente un cilindro móvil), un zoom para los cambios de escala diferenciales y una serie de prismas que permiten el giro de la imagen en cualquier sentido. Todos los movimientos están dirigidos por el ordenador en base a los cálculos realizados a partir del modelo digital. El ordenador calculará, para cada pequeña parte del negativo, las operaciones a realizar para anular las deformaciones propias de la proyección central. De esta forma, cada parte del negativo original se proyecta de nuevo hasta obtener otro negativo exento de errores.

Con imágenes digitales el proceso se limita a una reasignación de colores a cada elemento (píxel) de la nueva imagen a partir de los cambios de posición que se hayan determinado para los elementos de la imagen original.

Sobre una ortofoto no podemos observar estereoscópicamente el relieve al no disponer de su pareja estereoscópica. En caso necesario, puede crearse una pareja artificial utilizando los mismos procedimientos antes descritos. Naturalmente, esta segunda fotografía no es métrica y su única finalidad es la de permitir la formación y observación del modelo estereoscópico.

Por otra parte, la información contenida en una ortofoto es únicamente planimétrica por lo que con frecuencia interesa completarla con curvas de nivel, cotas, etc. Estos datos complementarios pueden incorporarse a la ortofoto o ir dibujados en un plano aparte, que se superpone a la ortofoto cuando sea necesario. La información altimétrica puede obtenerse del modelo digital del terreno.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Entre las aplicaciones de las ortofotos podemos mencionar:

- Conservación y restauración de objetos artísticos y monumentos.
- Fotointerpretación, por ejemplo en Geología. La gran ventaja de las ortofotos es que se puede medir sobre ellas, lo que facilita cualquier trabajo.
- Parcelación y catastro. Parece una de las aplicaciones más interesantes de la ortoproyección.
- Fotomapas de zonas urbanas donde la restitución tradicional resulta complicada y tediosa.
- Medio ambiente, restauración de terrenos, etc.
- Levantamiento fotogramétrico de zonas de gran vegetación, difícil de realizar por procedimientos clásicos.

2.7.- LEVANTAMIENTOS POR FOTOGAMETRÍA TERRESTRE

En fotogrametría terrestre se emplean, como sabemos, fotogramas tomados desde el suelo. dirección de la toma será, en general, horizontal aunque en algunos casos interesen direcciones de toma oblicuas o verticales.

La longitud de la base, es decir la distancia entre los dos puntos de toma de un par de fotogramas, es un parámetro fundamental para

determinar la precisión de las mediciones a efectuar en fotogrametría terrestre. En teoría, interesa que esta distancia sea mínima ya que así, si las dos direcciones de toma son paralelas, la zona común a los dos fotogramas será máxima; no olvidemos que solamente esta zona común puede ser restituida fotogramétricamente. En la práctica, esta distancia debe mantenerse entre ciertos

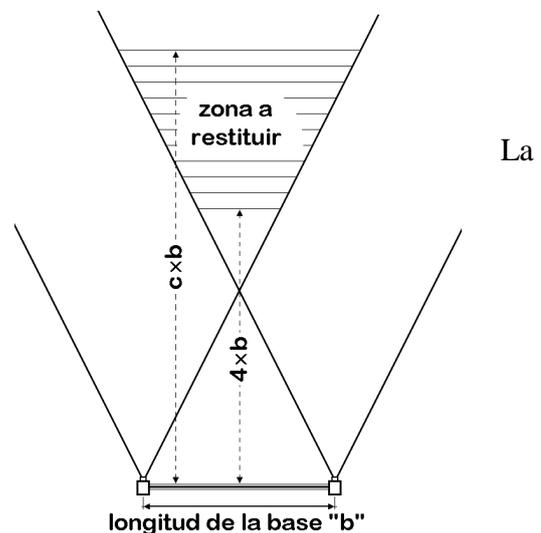


Fig. 20.19. Fotogrametría terrestre

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

límites para evitar que la precisión de las mediciones se vea afectada, pero también para conseguir un efecto estereoscópico adecuado.

Si llamamos $Y_{máx}$ e $Y_{mín}$ a las distancias máxima y mínima entre los puntos de la zona a restituir y los puntos de la base, se admite para fotogrametría terrestre que la longitud de la base b debe cumplir (figura 20.19):

$$\frac{Y_{mín}}{4} > b > \frac{Y_{máx}}{c}$$

siendo c la distancia focal de la cámara empleada expresada en centímetros.

La elección de las zonas donde van a establecerse las bases fotogramétricas debe hacerse teniendo en cuenta estos detalles. Para conseguir un nivel de precisión uniforme en todas las zonas restituidas fotogramétricamente debemos procurar evitar que haya diferencias importantes entre las distancias de los puntos más próximos a las bases y los más lejanos. Esto puede conseguirse con una adecuada elección de la ubicación de las bases. En ocasiones nos veremos obligados a utilizar dos bases para restituir una misma zona, una para los puntos más próximos y otra para los más lejanos. Como puede apreciarse, la elección de la ubicación de las bases es la más delicada entre las tareas a efectuar en fotogrametría terrestre, ya que de ella dependen desde el número de bases que va a ser preciso emplear hasta la precisión que cabe esperar en las mediciones.

En fotogrametría terrestre suele ser fácil determinar la situación exacta de la cámara y la dirección de toma de las fotografías, por lo que, en principio, se podría realizar la orientación sin necesidad de puntos de apoyo. Sin embargo, tanto en la toma de fotografías como en la restitución fotogramétrica se produce una serie de errores cuya eliminación es difícil si no se recurre a los puntos de apoyo. Por tanto, su empleo en fotogrametría terrestre es una práctica habitual y, desde luego, muy recomendable.

Los puntos de apoyo deben distribuirse por toda la zona a restituir y sus coordenadas se determinarán desde los puntos de la base cada vez que vayamos a tomar un nuevo par de fotogramas. En ocasiones, es preciso emplear otros sistemas como una serie de escalas graduadas que se sitúan sobre la zona a fotografiar. Tal es el caso de las aplicaciones en medicina, balística, etc., en los que se trabaja sobre objetos de tamaño muy reducido.

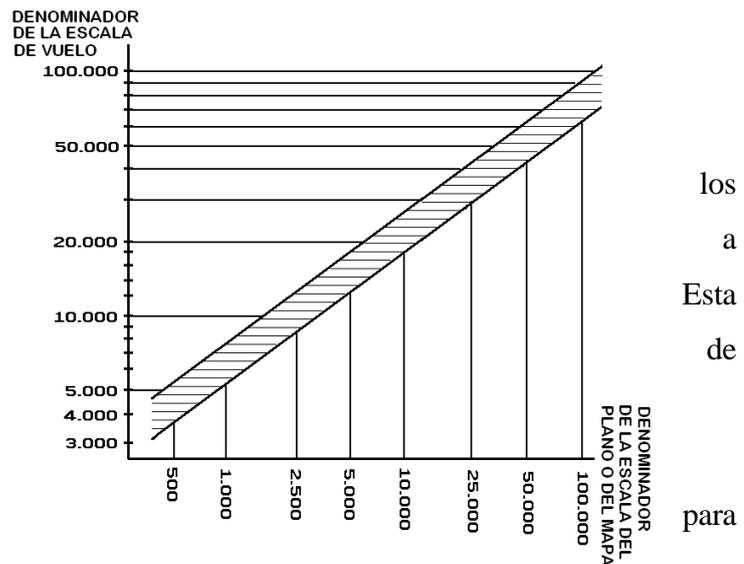
Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

2.8.- LEVANTAMIENTOS POR FOTOGRAMETRÍA AÉREA

La fotogrametría aérea constituye el procedimiento más importante para la obtención de planos y mapas a cualquier escala. Un trabajo de este tipo parte de la realización de un vuelo fotogramétrico, que será llevado a cabo por alguna de las empresas u organismos especializados existentes en nuestro país.

A partir del vuelo se realiza la restitución fotogramétrica. Si disponemos del instrumental fotogramétrico necesario podremos acometer nosotros mismos esta etapa; de lo contrario, la restitución será realizada por una empresa especializada, la misma que realizó el vuelo fotogramétrico u otra distinta. En cualquiera de los casos, la elección de muchos de los parámetros del vuelo fotogramétrico dependerá del uso final que se vaya a dar a los planos o mapas obtenidos del trabajo fotogramétrico. Esta elección es responsabilidad, por tanto, del usuario final de dichos planos o mapas.

El primer punto a considerar, como sucede en todo trabajo topográfico, es la escala de planos o mapas que van a obtenerse partir del trabajo fotogramétrico. Esta escala nos va a determinar algunos de los parámetros más importantes del vuelo, que están directamente relacionados con ella. Asimismo, una superficie de terreno dada los



costes del trabajo fotogramétrico van a depender, en buena medida, de la escala a la que trabajemos.

Para que los errores propios del trabajo fotogramétrico se mantengan dentro de límites aceptables, la escala de los planos o mapas a obtener y la de las imágenes fotogramétricas (fotogramas) deben mantener una cierta relación. En la figura 20.20, entrando con el denominador de la escala de los mapas o planos, obtenemos los valores máximo y mínimo del

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

denominador de la escala de los fotogramas a emplear. Por ejemplo, para obtener un plano a escala $1:1000$ la escala del vuelo puede oscilar entre $1:6.000$ y $1:8.000$, aproximadamente. La relación entre la escala del plano o mapa y la del vuelo también puede obtenerse de la expresión:

$$E_v = 200 \sqrt{E_p}$$

siendo E_v y E_p los denominadores de las escalas de vuelo y de plano, respectivamente.

Naturalmente, existen diferencias entre trabajar con fotogramas a una escala u otra. Para una escala de plano dada, cuanto mayor sea la escala del vuelo menores serán los errores. Por otro lado, cuanto menor sea la escala del vuelo menor será el número de fotogramas necesarios para cubrir una superficie de terreno dada, lo que supone menores costes de restitución fotogramétrica. Dentro de los límites que nos marca la figura 20.20 elegiremos la escala de vuelo según nuestras necesidades.

Para una escala de vuelo dada, el coste del vuelo fotogramétrico aumentará con la superficie de terreno a cubrir y, por tanto, con el número de fotogramas necesario, pero no de forma proporcional. En efecto, una parte de los costes del vuelo puede considerarse fija: puesta en marcha del vuelo, solicitud de permisos, etc. El resto de los costes será variable y, en una primera aproximación, proporcional al número de fotogramas: combustible del avión, material fotográfico, etc.

El coste de la etapa de restitución sí puede considerarse proporcional al número de fotogramas, ya que, en principio, el coste por cada par restituído será aproximadamente el mismo. Puesto que el tamaño de los fotogramas es fijo, $23 \times 23 \text{ cm}$, el número de fotogramas necesario para cubrir una superficie de terreno dada será inversamente proporcional al cuadrado del denominador de la escala de dichos fotogramas. En consecuencia, el vuelo debe planificarse de forma que el número de fotogramas sea el menor posible, siempre teniendo en cuenta las limitaciones relacionadas con la calidad del resultado a obtener y, en particular, con la precisión del mismo.

2.8.1.- Altura de vuelo

La altura de vuelo, o altura a la que debe volar el avión que realiza el vuelo fotogramétrico (figura 20.21), viene determinada por la escala del vuelo. La escala del vuelo es igual al cociente entre la distancia focal de la cámara fotogramétrica d y la altura de vuelo H . Por tanto, una vez fijada la escala del vuelo, la altura de vuelo debe ser:

$$H = \frac{d}{1 : E_v} = d E_v$$

Siendo E_v el denominador de la escala del vuelo.

En la práctica resulta imposible mantener una altura de vuelo perfectamente constante a lo largo de toda la sesión de toma de fotografías. Esto supone que la escala del vuelo va a cambiar de unos lugares a otros, especialmente si la topografía de la zona es bastante variable. Ya hemos indicado que en fotogrametría no se puede hablar más que de una escala media, ya que por estas y otras razones las distintas zonas de un fotograma tendrán escalas diferentes.

Estas variaciones, siempre que no sean excesivas, no suponen ningún problema práctico. A título indicativo pueden admitirse tolerancias del orden de un 10% en la altura del vuelo.

2.8.2.- Recubrimientos, base y distancia entre pasadas

Se conoce como *recubrimiento* el solape entre cada dos fotografías consecutivas, es decir la zona de terreno que aparece a la vez en ambos fotografías. La finalidad del vuelo fotogramétrico es la obtención de pares de fotografías estereoscópicas. La visión estereoscópica sobre cada par de fotografías consecutivas se limita a la zona de terreno común a los dos. Por

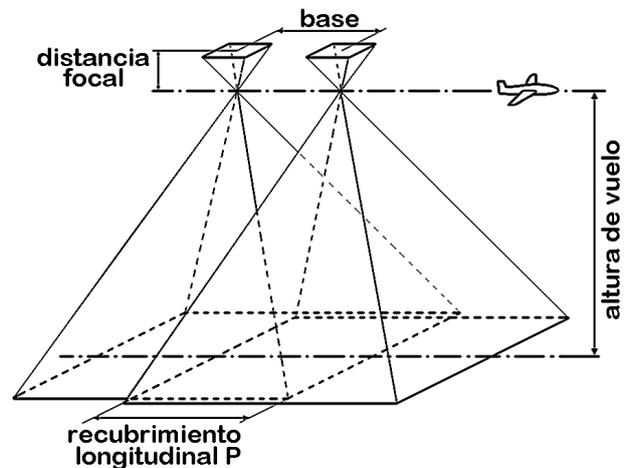


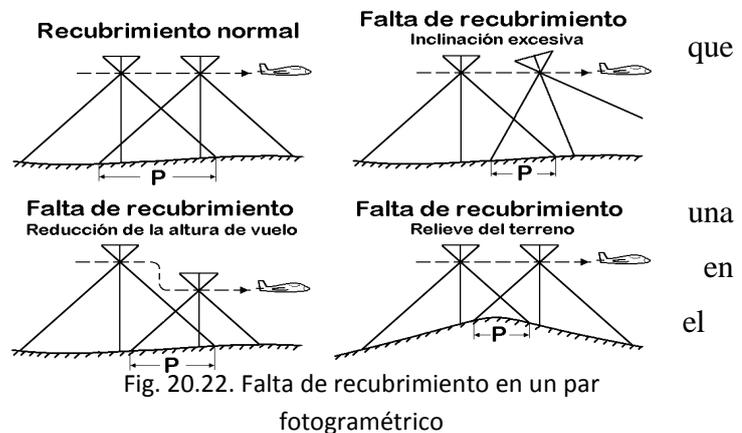
Fig. 20.21. Parámetros del vuelo fotogramétrico

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

tanto, el recubrimiento mínimo necesario para que cualquier zona del terreno a restituir aparezca en dos fotogramas consecutivos sería del 50% de la superficie de cada fotograma.

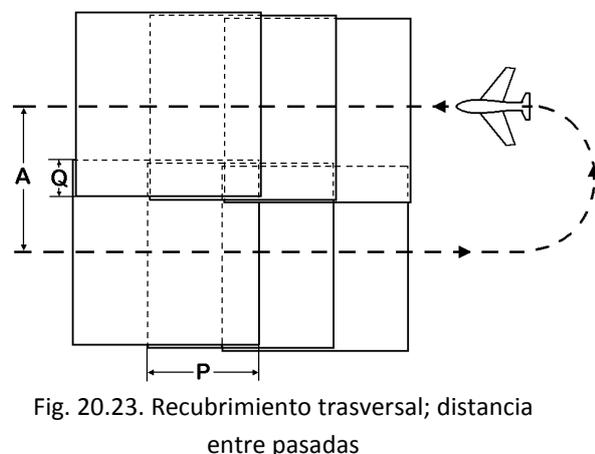
En la práctica es habitual utilizar un *recubrimiento longitudinal P* del 60%. El recubrimiento longitudinal es el solape entre fotogramas consecutivos en la dirección en que se mueve el avión. Con este valor tendremos la garantía de que pequeñas variaciones en la dirección de la toma o en la altura de vuelo no van a provocar que algunas zonas del terreno sean cubiertas por un solo fotograma y no puedan ser restituidas.

En la figura 20.22 se indican algunas posibles causas de el recubrimiento entre dos fotogramas consecutivos sea insuficiente: inclinación excesiva de de las dos tomas, variación brusca la altura de vuelo, cambio brusco en relieve. En el caso de que alguna zona del terreno a levantar foto-



gramáticamente no quedase cubierta por dos fotogramas nos veríamos obligados a levantarla por procedimientos topográficos clásicos, o a efectuar un nuevo vuelo limitado a esa zona.

Normalmente, la zona de terreno a fotografiar es bastante ancha y no puede ser cubierta de una sola vez, por lo que se hace necesario realizar varias pasadas con trayectorias paralelas entre sí (figura 20.23). El solape entre cada dos pasadas consecutivas se conoce con el nombre de *recubrimiento transversal Q*. Habitualmente se trabaja con recubrimientos transversales entre el 20 y el 30%. Las consideraciones que se han hecho al referirnos al



Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

recubrimiento longitudinal son válidas para el transversal. La falta de recubrimiento entre dos pasadas sucesivas supone que alguna zona de terreno no aparecerá en ninguno de los pares correspondientes a cada una de las pasadas y, por tanto, no podrá ser restituida.

Base es la distancia que debe recorrer el avión entre cada dos disparos consecutivos de la cámara fotogramétrica. Normalmente, estas cámaras disponen de mecanismos programables para realizar estas operaciones de forma automática.

Si denominamos S a la distancia en el terreno correspondiente a la longitud del lado del fotograma ($S'=23cm$), tendremos:

$$S = \frac{S'}{\text{escalade vuelo}} = \frac{S'}{1 : E_v} = S' E_v$$

La base B vendrá dada por la expresión:

$$B = S \left(1 - \frac{P}{100}\right)$$

Siendo P el recubrimiento longitudinal expresado en tanto por ciento. En efecto, para que el solape entre fotogramas consecutivos sea del $P\%$ la distancia entre tomas ha de ser el $(100-P)\%$ de la longitud S . De igual modo, la distancia A entre dos pasadas consecutivas del avión se determina a partir del recubrimiento transversal Q (figura 20.23):

$$A = S \left(1 - \frac{Q}{100}\right)$$

2.8.3.- Plan de vuelo. Geometría del vuelo. Limitaciones a considerar

Una vez elegidos los parámetros del vuelo procederemos a establecer el plan del mismo y a determinar el número aproximado de fotogramas necesario, para poder realizar una estimación de los costes del trabajo fotogramétrico. Además de esto, a la hora de realizar el vuelo

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

fotogramétrico habrá que tener en cuenta otros detalles que van a influir en la calidad de los fotogramas, tales como existencia de nubosidad, posición del Sol, etc.

Siempre que sea posible, la dirección del vuelo debe elegirse de forma que se minimice el número de fotogramas necesario para cubrir totalmente el terreno a restituir. En efecto, si este terreno tiene una forma rectangular lo más conveniente será que la dirección del vuelo sea paralela al lado mayor del rectángulo. De esta manera resulta más sencillo adaptar las pasadas del avión a la forma del terreno y se reducirán las zonas exteriores que aparezcan en los fotogramas. Además, la misma superficie se podrá cubrir con un menor número de pares lo que supondrá menos costes tanto en el vuelo como en la restitución.

No olvidemos que para evitar que queden zonas del terreno no cubiertas por ningún de fotogramas es necesario que la primera y la última pasadas sobresalgan ligeramente del área a restituir. Del mismo modo, el primer y el último de cada pasada deberán exceder ligeramente los límites de la zona de interés.

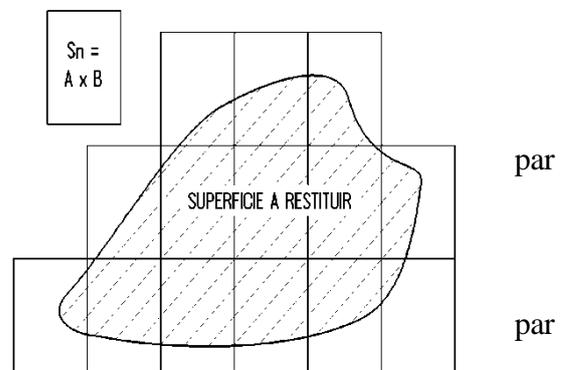


Fig. 20.24. Estimación del número de pares necesario

Para estimar el número de pares fotogramétricos necesarios para un trabajo determinado consideraremos que la superficie de terreno cubierta por cada fotograma será $S \cdot S = S^2$. Puesto que cada dos fotogramas consecutivos se solapan un $P\%$ y cada dos pasadas consecutivas del avión se solapan un $Q\%$, la superficie estereoscópica a restituir en cada par de fotogramas será:

$$S_n = S^2 \left(1 - \frac{P}{100}\right) \left(1 - \frac{Q}{100}\right) = A B$$

Por consiguiente, el número n de fotogramas necesario para cubrir una superficie de terreno S_a sería, teóricamente: $n = S_a/S_n$. En la práctica el número de fotogramas n puede ser considerablemente mayor, ya que es imposible conseguir que las distintas pasadas del avión se adapten exactamente a la forma del terreno a restituir, especialmente si ésta es muy irregular

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

como la de la figura 20.24. En función de la forma del terreno, de su tamaño y de la escala del vuelo, las zonas exteriores que aparezcan en los fotogramas, y que no interesa restituir, pueden ser más o menos importantes. Con el fin de tener una idea aproximada del número de pares necesario y, por tanto, de los costes implicados en el trabajo fotogramétrico, incrementaremos el valor de n en una proporción que puede oscilar entre el 10 y el 30%.

Durante el vuelo, y debido a turbulencias atmosféricas y a otras causas, es imposible conseguir que la alineación de cada pasada sea perfecta y que la dirección de toma sea totalmente vertical. Los fotogramas se verán afectados por inclinaciones variables de la cámara en las tres direcciones del espacio: longitudinal, transversal y vertical. Estas inclinaciones se corrigen durante la etapa de orientación de cada par fotogramétrico. Algunos equipos fotogramétricos presentan limitaciones de tipo mecánico, que imposibilitan la orientación si las inclinaciones de la cámara son excesivas. Es preciso conocer las características del equipo de restitución que se va a emplear y marcar unas tolerancias a la hora de encargar el vuelo fotogramétrico.

Capítulo 3

Calibración.

3.1.-introducción.-

Introducción al programa Photomodeler y proyecto en si

La calibración es el proceso inicial de nuestro proyecto, es el apartado más importante y a tener más en cuenta, ya que en este proceso podemos minimizar nuestros errores a la hora de la toma de las fotografías.

Cada vez hay más información acerca de este tema que lo tocaremos más adelante de forma más técnica y cada vez encontramos más información debido a que las cámaras tienen una amplia gama en stock y de mucha variedad de precios y calidad, y esto requiere conocer ciertos parámetros para que el programa funcione con la máxima eficiencia para la que fue diseñada

Y... ¿Qué es en realidad una calibración?

Pues bien, por calibración, desde un punto de vista técnico, entendemos un proceso en el que de la toma de fotografías trataremos de obtener:

- **Los parámetros geométricos**

- o Distancia focal
- o Coordenadas del punto principal
- o Dimensiones del sensor CCD

- **Los parámetros físicos**

- o Parámetros de la distorsión radial
- o Parámetros de la distorsión tangencial

También pueden incluirse entre estos últimos la falta de planaridad del plano imagen y del plano focal, si bien estos dos problemas desaparecen en el caso de las cámaras digitales, por lo que este punto no nos preocupa. [Arias Pérez et al., 2005]

Visto de otro modo, la calibración no es otra cosa que un método de determinación de los valores y parámetros **reales** y necesarios de **nuestra** cámara para, una vez calibrada ésta, obtener la mayor precisión posible en nuestros proyectos.

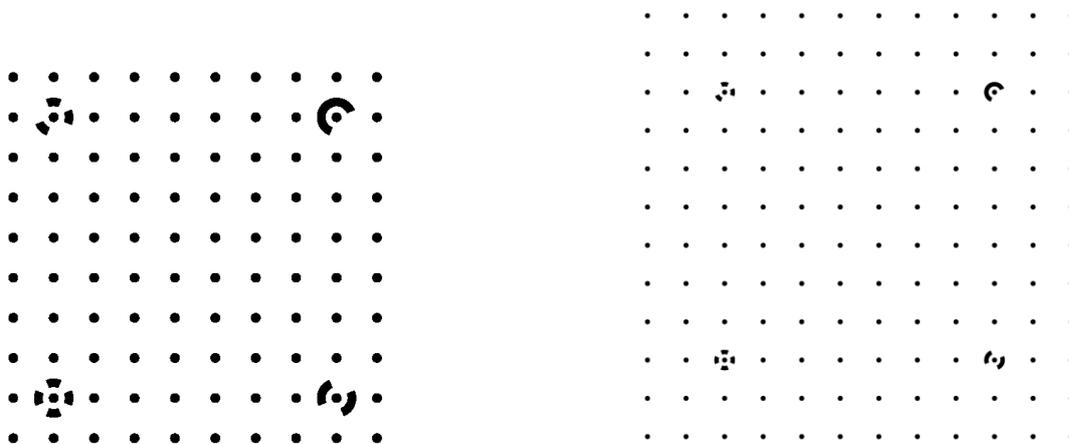
3.2.- Procedimientos

Desde un punto de vista operativo, a la hora de llevar a cabo una calibración se dan diferentes alternativas:

- Podemos obtener la calibración estableciendo una transformación entre las coordenadas imagen 2D y las coordenadas del mundo real 3D. Algunos programas como Pictran utilizan este método.
- Otra alternativa es la de utilizar haces proyectivos conocidos en su forma y posición. El procedimiento del multicolimador es muy utilizado en calibración de cámaras aéreas en laboratorio y de una precisión muy elevada.
- O por otro lado, fotografiar patrones-objeto con características o restricciones geométricas tales como colinealidad, coplanaridad, ortogonalidad, puntos de fuga y otros, que facilitan la calibración sin necesidad de realizar mediciones auxiliares. [Arias Pérez et al., 2005]

Photomodeler obtiene los datos necesarios para llevar a cabo la orientación interna de la cámara utilizando este último método, mediante el uso de un patrón impreso de conocidas características, especialmente diseñado para la sección de calibración del programa.

Según nuestros intereses, el programa pone a nuestra disposición dos patrones con distintas características, y son estos:



Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Ambos archivos, que están almacenados por defecto en la carpeta de instalación del programa, tienen a la postre la misma finalidad, aunque las diferencias saltan a la vista.

3.3.- Calibración con Photomodeler

Una vez con la plantilla para cámaras de alta resolución impreso y debidamente colocado y con nuestra cámara apropiadamente configurada, nos dispusimos a dar por fin los primeros pasos. Así, basándonos en un par de video-tutoriales que Photomodeler pone a nuestra disposición en su página web comenzamos a tomar fotografías del patrón según se indica en el apartado anterior.

Tomamos una foto desde cada lateral del patrón con la cámara en posición natural.

Tomamos después una foto desde cada lateral del patrón girando la cámara 90° hacia izquierda o derecha desde su posición natural.

Tomamos por último una foto desde cada lateral del patrón girando la cámara 180° desde la posición 2.



Ilustración 3 fotografías giradas

Una vez tomadas las fotografías válidas (ver “Incidencias”) descargamos éstas al ordenador y comenzamos el proceso de calibración, para lo cual abrimos Photomodeler.

En la pantalla de inicio por defecto de Photomodeler se nos dan varias opciones

Desde crear proyectos de diversa índole hasta acceder a interesantes enlaces online o a la



Ilustración 4 pagina de bienvenida photomodeler

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

ayuda. Nosotros elegiremos un nuevo proyecto del tipo: “Camera Calibration Project”. En la siguiente ventana simplemente hemos de elegir las 12 fotografías de calibración que hemos tomado, para añadirlas al proyecto y avanzar

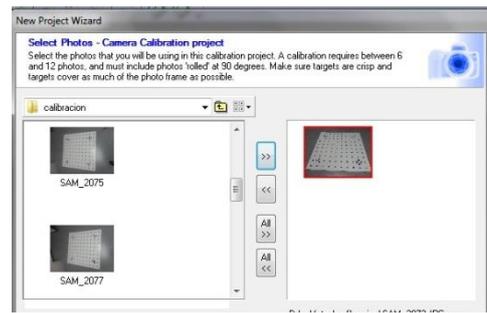


Ilustración 6 ingresar fotografías de calibración

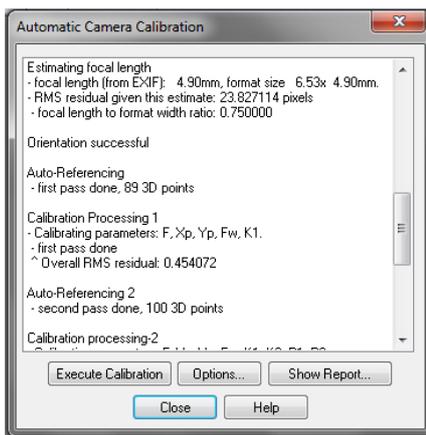
Pasamos a un estado de “stand-by” en el que Photomodeler espera nuestra orden. Nos muestra las 12 fotos elegidas y una ventana denominada “Automatic Camera Calibration”.



Ilustración 5 proceso de calibración

Una vez demos la orden al programa, este empezará a procesar la calibración. Reconociendo los 144 puntos del patrón de calibración de cada foto, entre los que distinguirá los 4 puntos de control. Este proceso llevará unos minutos. Como podemos comprobar, si bien Photomodeler logra identificar todos los puntos, puede que el programa encuentre uno o dos puntos de más en alguna foto. Siempre que sea un hecho aislado no debe preocuparnos. Aun así, lo tendremos en cuenta.

Como hemos dicho antes este proceso tarda unos minutos, dando los primeros resultados como veremos a continuación.

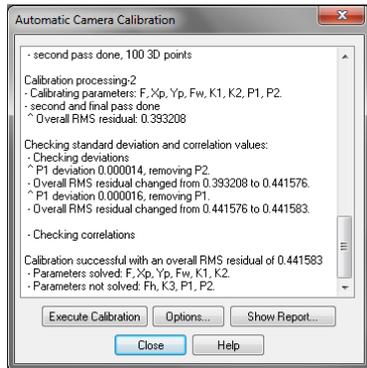


En ella podemos ver la distancia focal de 4.90mm. y un tamaño de sensor de 6.53 x 4.90 mm y un error de 23.82 píxeles que mas adelante en una segunda iteración vemos como es reducido gracias a las características del programa que lleva incorporado una corrección muy buena que garantizará los resultados optimos que busamos. Podemos ver que ha encontrado 89 puntos en 3D que es lo que ayuda a calibrar la cámara.

el programa auto-referencia los 144 puntos en las 12 fotografías y al conocer de antemano las restricciones (denominadas “Constraints”) geométricas del patrón de las que hablábamos en “Calibración - Procedimientos” pasa a realizar una primera iteración de la que obtendrá algunos de los parámetros mencionados ya en “Calibración – Generalidades”, los parámetros geométricos; Distancia focal (F),

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

coordenadas del punto principal (X_p , Y_p) y una de las dimensiones del sensor CCD (F_w); y

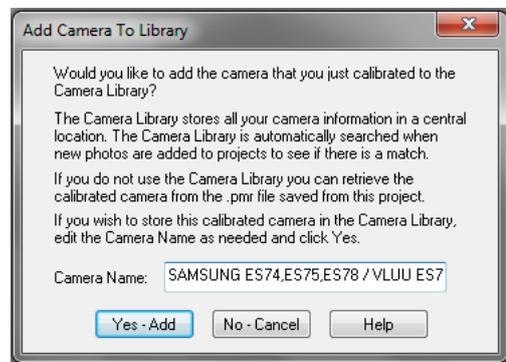


uno de los parámetros físicos; Un primer parámetro de la distorsión radial (K_1).

Una vez realizada la primera pasada y obteniendo los parámetros F , X_p , X_y , F_w y K_1 Photomodeler nos muestra de nuevo el error cuadrático medio, que en esta ocasión es de 0,45 píxeles, reduciendo así el RMS primitivo en 23 píxeles.

Y dando un segundo error cuadrático de 0.39 píxeles, teniendo así un considerable ajuste. Y es con los datos que trabajaremos en nuestro proyecto.

Una vez conseguimos esta pantalla le damos a “Close” y nos aparecerá la opción de guardar esta calibración con el siguiente nombre de nuestra cámara, en este caso “SAMSUNG ES74,ES75,ES78 / VLUU ES75,ES78 [4.90]” y le damos un clic a la opción “Yes-Add” para poder guardar los datos de calibración, luego nos aparecerá el navegador donde nos dará la opción de guardarlo en un directorio donde luego podemos almacenar más de una cámara fotográfica y así tendremos una librería de cámaras.



Capítulo 4

TRABAJO

DE CAMPO

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

4.1.- Introducción

Una vez tengamos calibrados la cámara, paso muy importante en nuestro proyecto tenemos que tener claro nuestro objetivo, nuestro objetivo se va a centrar en el puente ubicado en sangonera la verde, lo cual tenemos que tener en mente nuestro objetivo que es el modelado en 3D del mismo, para ello vamos a necesitar hacer un estudio de campo, para ver los detalles y crear un primer proyecto de los pasos a seguir, que brevemente lo resumiré de la siguiente manera, lo primer que fue ver los sitios y los ángulos de los cuales obtendré la fotografía, para ello tuve que ver las zonas en las cuales pueda entrar todo el puente desde una misma foto para ello tuve que retroceder algunos metros para poder obtener las fotografías con calidad aceptable.

Una vez obtenidas las fotografías, aunque tuve que ir varias veces al lugar ya que cometía muchos errores a la hora de la toma de la fotografías como sombras indeseadas, que luego lo comentare con mas detalle en un apartado para tomar en cuenta.

Una vez con las fotografías y con algunas horas de tutoriales del programa pude ver como vincular puntos de una foto a otra ue luego lo detallaré en el siguiente apartado, dando así a los puntos en 3D que obtuve de las fotografías y que luego pasé a AutoCAD, donde con los datos del Photomodeler y topografía clásica pude obtener el resultado final.

Este es a grandes rasgos una pincelada de nuestro proyecto que el siguiente apartado veremos con más detalle.



Ilustración 7 puente proyecto

4.2.- Aplicación del Photomodeler.

Una vez calibrado nuestra cámara Samsung, el siguiente paso es ir a la ubicación de nuestro puente-proyecto y empezar con las fotografías, aquí tenemos muestra de algunas de ellas donde, al ser las primeras podemos ver algunos errores como las sombras, ya que llegado a la comodidad de nuestro escritorio y abriendo con el zoom me pude dar cuenta que las fotos no se apreciaban las aristas por culpa de las sombras. Así que teniendo esto como experiencia tuve que coger nuevas fotos ya teniendo en cuenta la hora y el ángulo necesario para poder

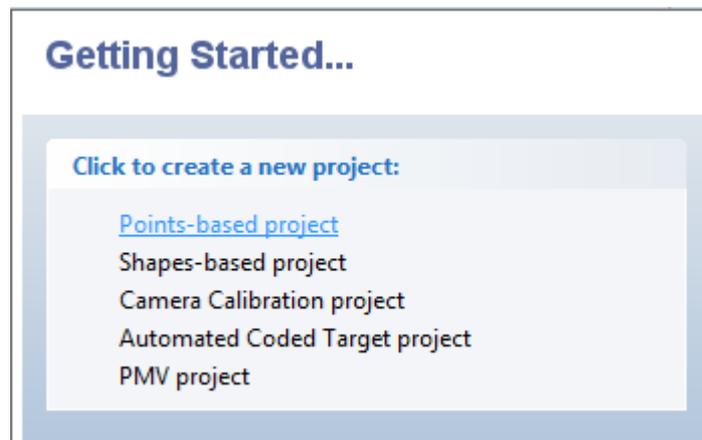


Ilustración 8 primeras fotos con error

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

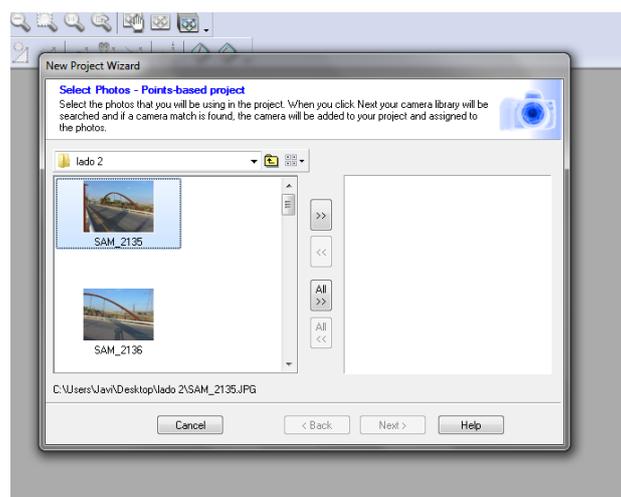
obtener una cara lo suficientemente bien iluminadas para poder trabajar con ellas.

Así, tras abrir Photomodeler, lo primero que hemos de hacer es comenzar un nuevo proyecto basado en la referenciación de puntos homólogos un, textualmente, “Points-based Project”:



El siguiente paso que completaremos será el de elegir las fotografías con las que comenzaremos a procesar el levantamiento fotogramétrico de nuestro puente.

Para empezar con buen pie, es aconsejable que empecemos con un número reducido de ellas a partir de las que iremos progresivamente aumentando, al poder ser de una en una, con la finalidad de poder así ir controlando de una forma eficiente los errores residuales y cuadráticos medios que irán surgiendo al completar la orientación relativa de cada una de las imágenes:



Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

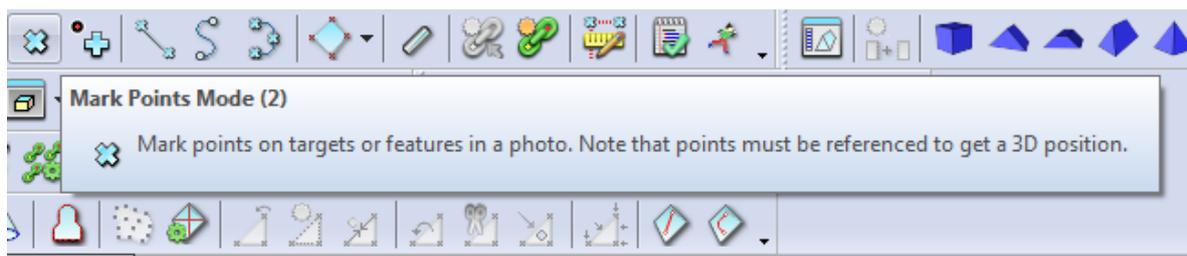
Asimismo, además de comenzar con un escueto grupo de fotografías es interesante elegir las correctas y coherentemente, de manera que las fotografías escogidas presenten, como parece lógico, el mayor número de puntos relevantes comunes entre sí como sea posible.

Por tanto, a la hora de emprender nuestro trabajo, puede ser una buena estrategia el elegir un grupo pequeño de imágenes de una misma parte del puente que consten de un ángulo de separación entre ellas lo suficientemente grande como para poder establecer una relación correcta pudiendo así asignar puntos homólogos sin problemas de precisión u optimización e incluso de reconocimiento por parte del programa.

Tras elegir concienzudamente las imágenes con las que abordaremos nuestra tarea, Photomodeler nos detecta de forma automática que esas imágenes han sido tomadas con una cámara y unas condiciones de captura idénticas a las que se dieron al obtener los ficheros de calibración.

A partir de aquí, comenzamos a marcar y referenciar en los distintos fotogramas aquellos puntos que consideremos relevantes y que definan algún elemento visiblemente importante.

De tal forma, en una de las imágenes elegidas, empezaremos a marcar puntos relevantes intentando repartir estos por el fotograma de manera que quede cubierta la gran mayoría de la imagen para garantizar así una orientación correcta. Para llevar a cabo esta operación haremos uso de la siguiente herramienta:



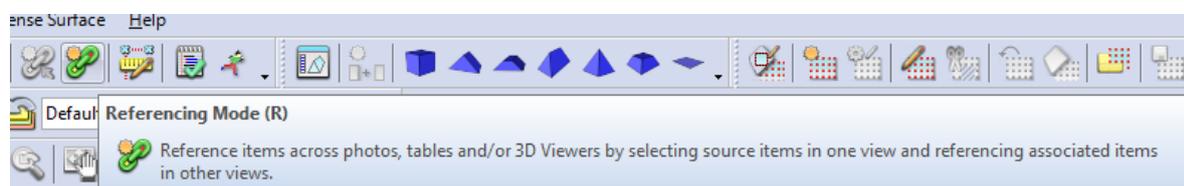
Tras marcar con ella un determinado número de puntos en una de las imágenes, nos disponemos entonces a relacionar éstos con los mismos puntos del resto de imágenes, esto es, nos disponemos a referenciar puntos. Antes, observemos cual es el aspecto de un fotograma con una serie de puntos marcados en esa única imagen

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde



En este caso utilizamos la herramienta de rectas para poder ir haciendo los tubos de 10 cms de diámetro de nuestro puente.

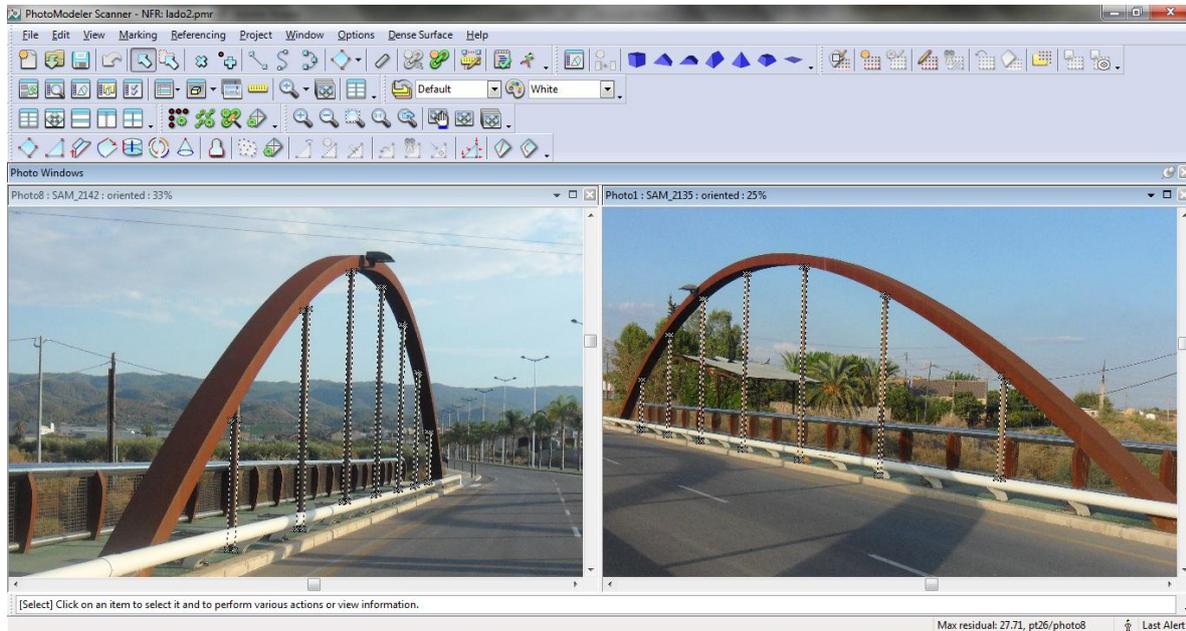
Como podemos ver, los puntos marcados aparecen en la imagen tratada representados mediante una cruz de color gris que, por defecto, es el color que identifica a aquellos puntos no referenciados. El código de colores es algo a tener en cuenta durante todo el procesado en Photomodeler, pues en alguna ocasión nos encontraremos con algún punto cuyo color nos advierta de una posible irregularidad. Ahora sí, nos disponemos a referenciar en diferentes fotogramas los puntos identificados en la primera imagen. Para ello, utilizaremos otra esta herramienta:



Con ella, elegimos la marca del punto de la primera imagen que queremos referenciar en las nuevas fotografías y, tras ello, marcamos en éstas el mismo punto, quedando entonces relacionados entre sí. Photomodeler toma buena nota de ello y tiene en cuenta, para el cálculo de la orientación relativa, que dichos puntos son el mismo, pero en diferentes imágenes.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Así, realizando esto de manera reiterativa para el resto de puntos marcados en la primera imagen, conseguiremos brindar al programa los suficientes datos como para que oriente, de manera certera, las imágenes de forma relativa. Veamos antes el aspecto de un par de imágenes con una serie de puntos referenciados entre sí:



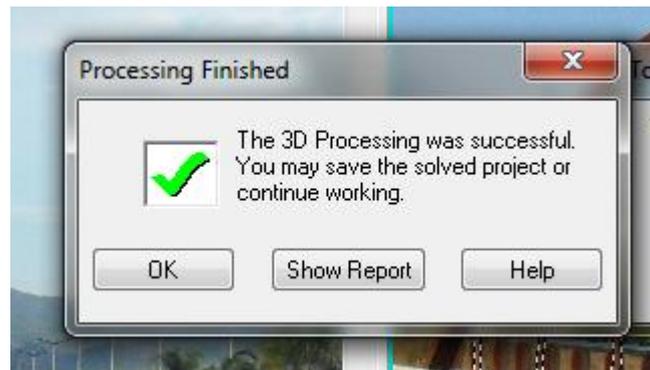
Llegados a este punto, cabe mencionar que tanto para el simple marcado de puntos como para el posterior referenciado de los mismos hemos de utilizar un criterio lógico a la hora de utilizar, o no, un punto en una imagen. Así, si un punto no es representado en ella con precisión o no es visible con suficiente claridad y resulta entonces ambigua su posición, optaremos por obviar el marcado de dicho punto, al menos en la imagen en que se dé alguno de estos supuestos, dejando su referenciación para aquellos fotogramas en que la garantía de precisión sea considerablemente alta.

De tal forma, siguiendo estas premisas, marcaremos puntos con las herramientas que el programa nos facilita haciendo uso además en todo momento del zoom que nos sea oportuno, y, si la precisión de los puntos es suficiente, el ángulo entre tomas es el adecuado y hemos realizado la referenciación de puntos homólogos de manera correcta, Photomodeler conseguirá orientarnos relativamente las imágenes con tan sólo un mínimo de 6 puntos referenciados entre sí por toma. No obstante, las orientaciones relativas que el programa realiza con tan reducido grupo de puntos suelen ser algo precarias, más aún si dicho grupo de puntos no queda bien repartido por todo el ámbito de la imagen. Por ello, consideramos

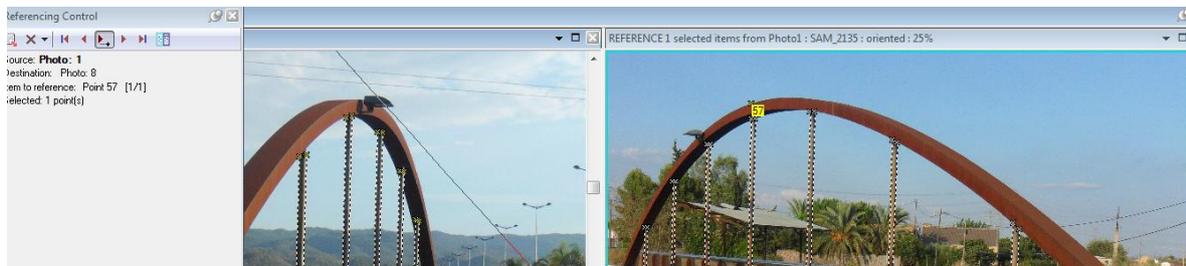
Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

oportuno referenciar un número elevado de puntos, definan o no una estructura o parte diferencial visible, dando así rigidez y exactitud al conjunto en la medida de lo posible.

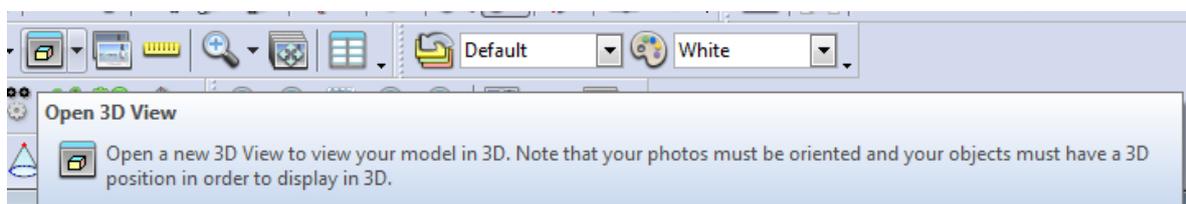
Una vez tenemos todo referenciado con los puntos suficientes que estén abarcando gran porcentaje de la fotografía es momento de orientar las imágenes para poder trabajar con ellas. Esto lo haremos pulsando F5 y luego “process”.



Este proceso lo hacemos para garantizar la orientación y poder trabajar más rápido con las fotografías por que una vez orientadas las fotografías con las que estamos trabajando. Elegimos un punto y este a la hora de referenciarlo nos aparecerá una línea donde el proyecto cree que se encuentra en punto en cuestión. Facilitándonos el trabajo.

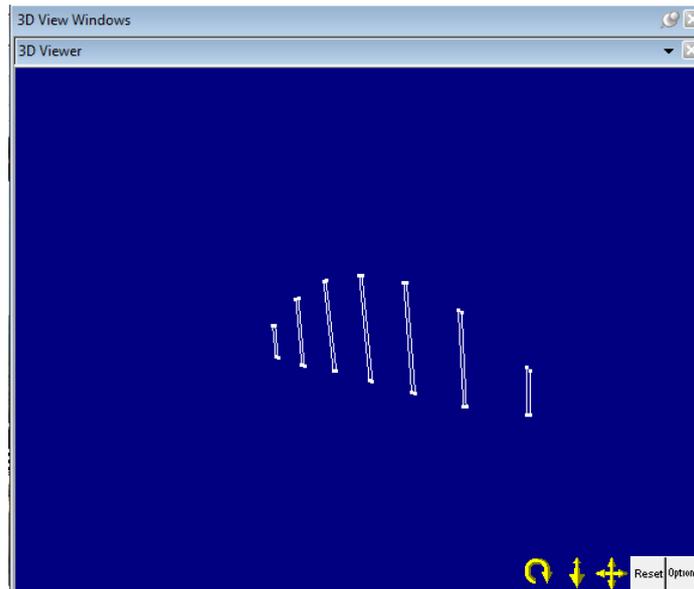


Una vez obtenido todos los puntos y haber realizado este proceso muchas veces siempre cuidando que el error no sea muy elevado. Podemos obtener una primer vista de nuestro puente. Para ello tenemos la opción:



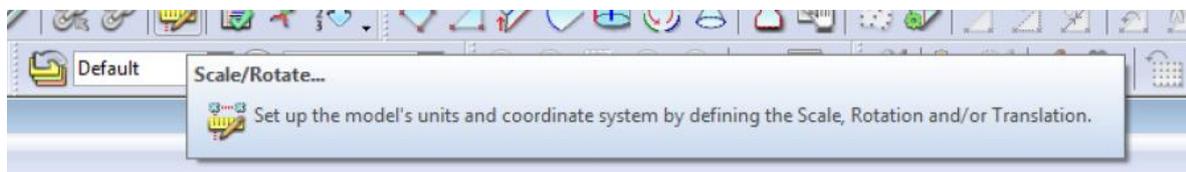
Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Al pulsar nos genera una pantalla azul con los puntos calculados en 3D con un error muy bajo gracias a nuestra calibración. Con estos puntos conseguidos serán la base de nuestro proyecto, es lo que queríamos obtener del Photomodeler, ya que nos da una vista en 3D de nuestro puente, y estos puntos nos ayudaran a darle forma en el AutoCAD.



Ahora con esto lo que haremos será darle dimensión y ubicarlo en el espacio. Para ello previamente hemos medido las dimensiones del puente para tener una idea. En mi caso medí la primera columna. Y esto lo hacemos para poder darle dimensiones reales para luego poder exportarlo al AutoCAD.

Tras obtener un modelo adimensional, nos vemos en la obligación de escalarlo y otorgarle así la condición de absoluto, ayudándonos para ello de los datos que, por topografía clásica, tomamos.

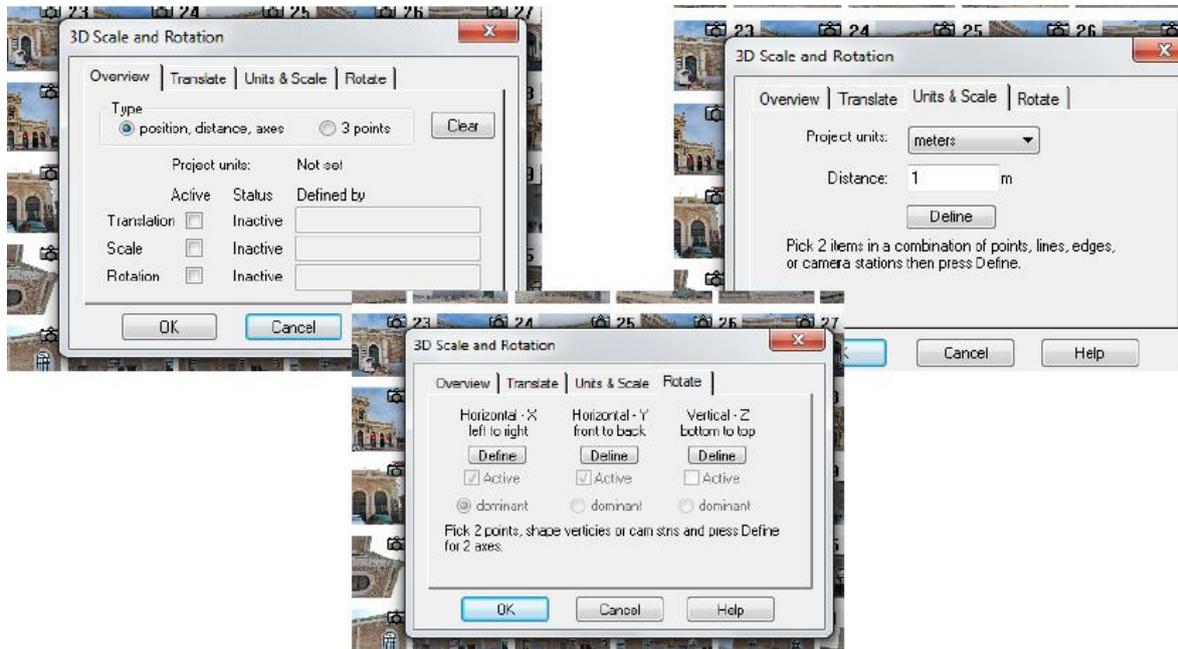


Con el fin de conseguirlo, Photomodeler nos brinda dos posibilidades y, a nuestro juicio, decantarse por una o por otra es prácticamente aleatorio. En la imagen anterior vemos el comando que nos permitirá hacerlo.

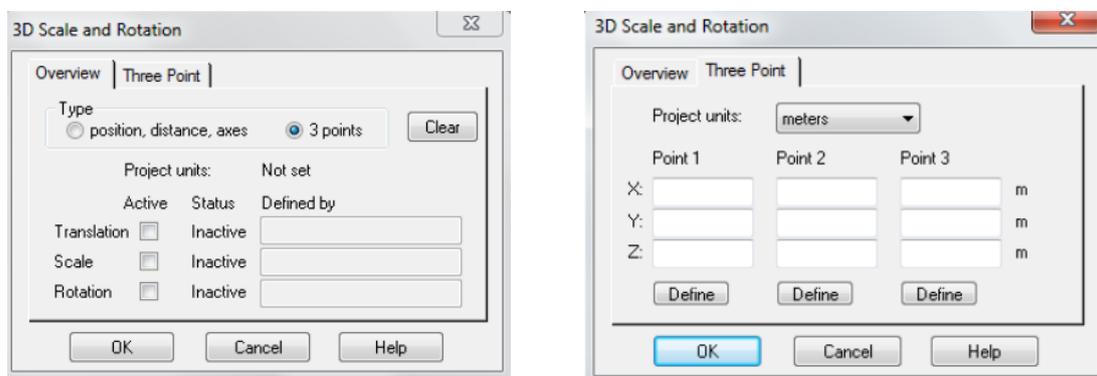
Por un lado, Photomodeler nos da la oportunidad de orientar de manera absoluta nuestro trabajo definiendo tan sólo una distancia entre puntos, aristas o centros de proyección para

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

escalar el modelo, y dos de los ejes del sistema tridimensional en el que trabajamos para orientarlo a nuestro gusto

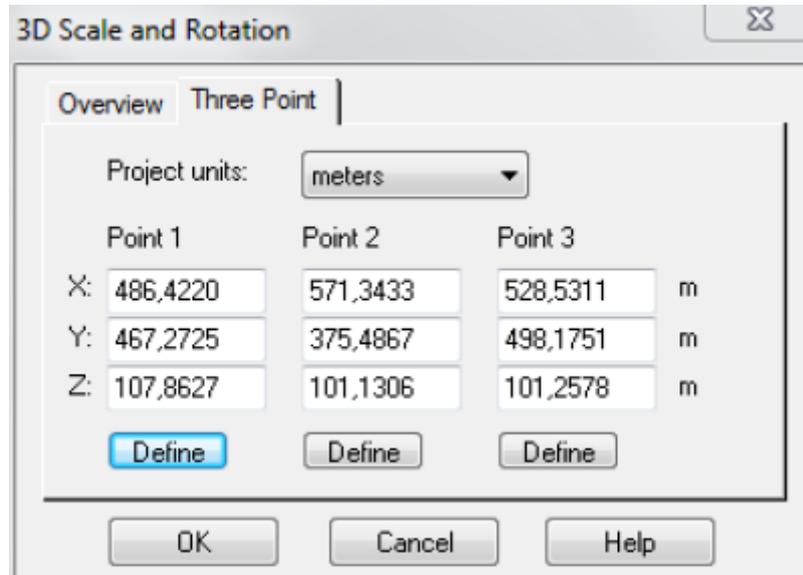


Por otro lado, como vemos en las imágenes siguientes, la posibilidad de dar coordenadas a los 3 puntos que elijamos de entre todos los que forman el modelo tridimensional. El cual es el que nosotros elegimos para la orientación absoluta de nuestro proyecto adimensional. Y que a continuación explicamos paso a paso.



Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

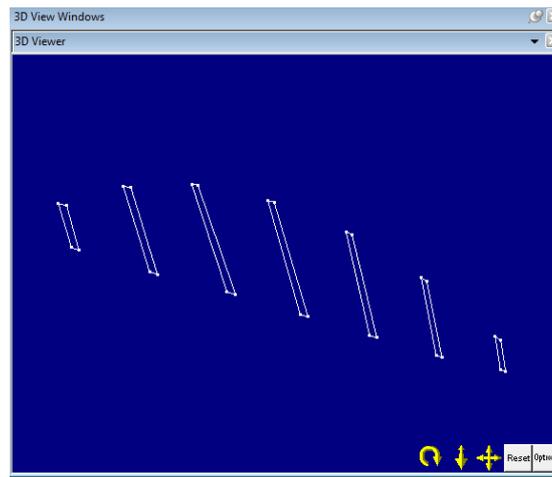
Lo primero que haremos será elegir la opción de “3 points”, y una vez marcada esta, nos vamos a la pestaña donde pone “Three point”. Una vez dentro de esta, elegimos la unidad del proyecto, y como sabemos, elegimos la opción de “meters”, debido a que nuestros cálculos topográficos los hicimos con esta unidad de medida. Ahora elegimos tres puntos conocidos.



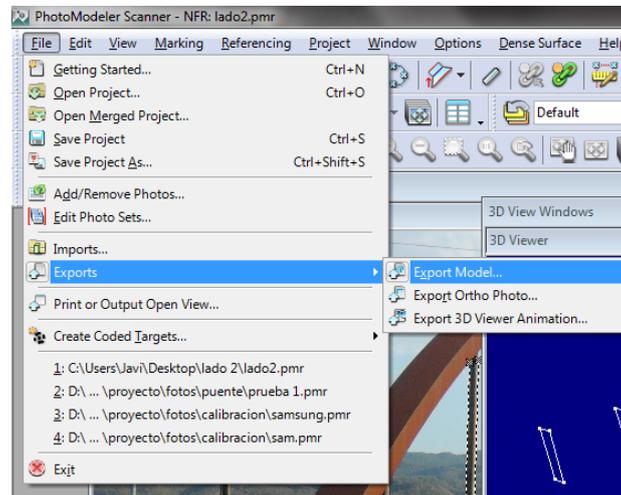
ya tenemos introducidos las tres coordenadas de cada uno de los puntos necesarios para la orientación absoluta, una vez hecho esto, tenemos que definir cada uno de los puntos, para ello pincharemos en “define” y le indicamos el punto al que corresponde esas coordenadas, ya sea en una imagen o en el modelo tridimensional. Una vez definido todos los puntos hacemos clic en “OK” y ya está listo, orientado.

Una vez orientado y dimensionado nuestro proyecto podemos exportarlo al AutoCAD.

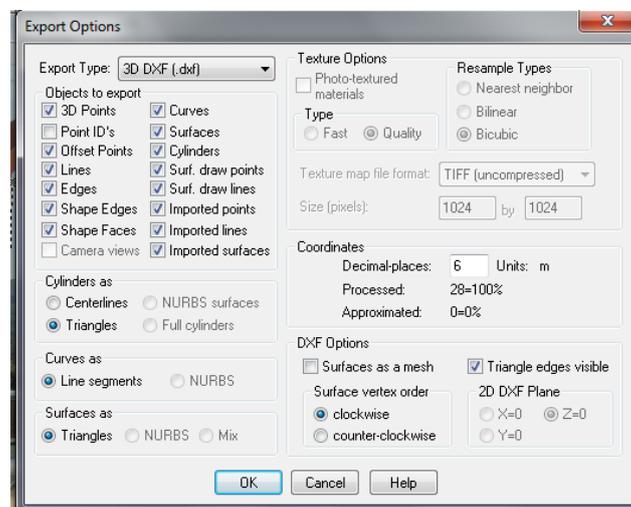
Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde



Para poder exportar estos datos al AutoCAD tenemos que ir al siguiente punto:

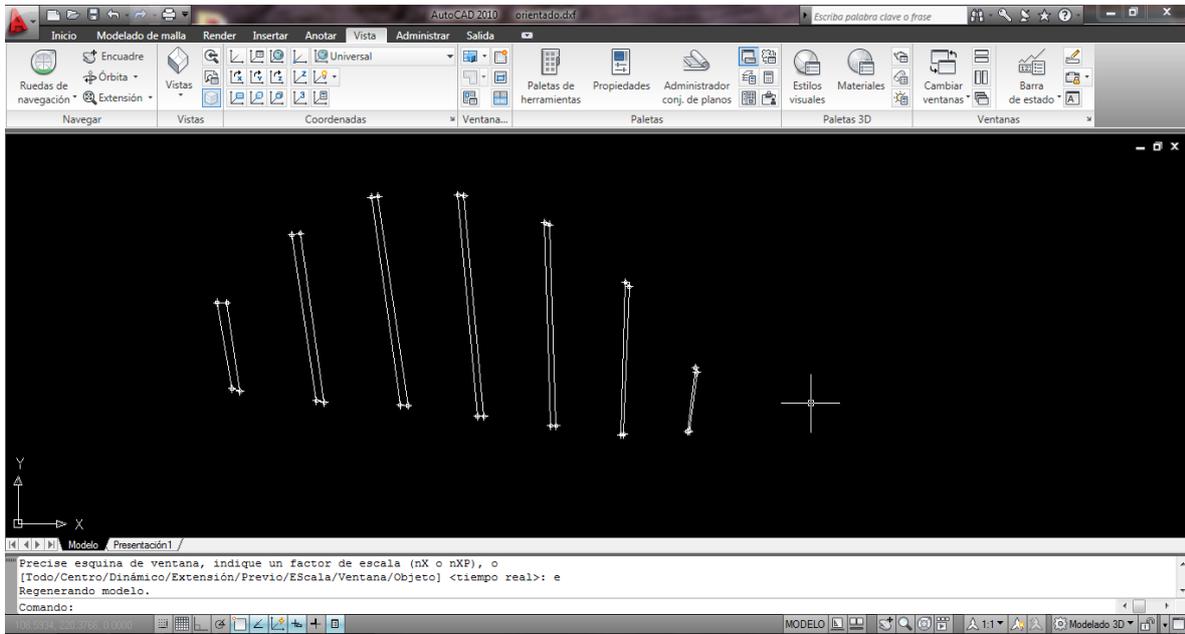


Luego nos aparece la siguiente pantalla y le damos a aceptar y buscamos el destino donde queremos guardar este archivo, que luego lo necesitaremos para abrirlo desde AutoCAD.



Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Abrimos AutoCAD 2010 en nuestro caso y veremos los resultados obtenidos y veremos con los ejes de la izquierda inferior de la pantalla que esta ubicado en los ejes “X” e “Y” tan y como lo necesitamos para empezar a darle profundidad con los puntos topográficos que obtendremos a continuación.



Como habíamos mencionado antes, necesitamos datos topográficos de nuestro puente, en nuestro caso lo realizamos con una maquina LEYCA TPS 407. LASER. Donde obtuvimos los puntos del puente organizados de la siguiente manera

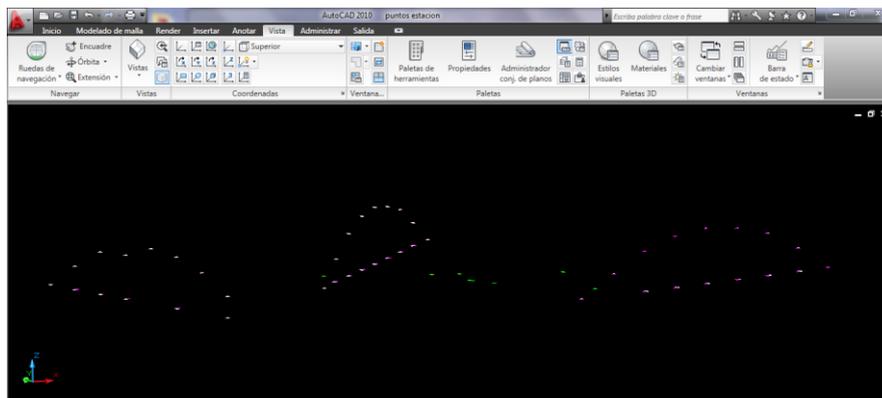


Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Estacionando en dos puntos obtuvimos los siguientes puntos que conviene pasarlo a Excel para poder trabajar muy cómodamente, ya que este es muy compatible con AutoCAD, de este modo obtenemos la siguiente tabla con todos los puntos:

		punto 1 -> h=153,6 cm.				punto 2 -> h=151,2				punto 3 -> h= 155			
		X	Y	Z	Dist	X	Y	Z	Dist	X	Y	Z	Dist
3	1	95.514	210.748	9.997	11.738	148.327	204.021	9.733	48.525	68.799	218.628	10.973	36.432
4	2	98.354	213.988	12.364	14.113	144.31	202.421	12.156	44.382	69.443	214.326	13.391	33.804
5	3	101.239	217.153	14.365	17.198	140.271	201.102	14.127	40.375	70.337	210.187	15.352	31.604
6	4	104.115	220.194	15.565	21.062	136.238	199.787	15.065	36.418	71.188	206.029	15.509	29.866
7	5	107.039	223.37	15.89	24.806	132.206	198.467	15.469	32.492	72.069	201.885	16.67	28.475
8	6	109.885	226.435	15.366	28.492	128.172	197.134	15.099	28.551	72.971	197.747	16.31	27.554
9	7	112.767	229.556	14.466	32.345	124.135	195.777	13.986	24.632	73.873	193.58	15.189	27.162
10	8	115.662	232.724	12.522	36.294	120.087	194.462	12.071	20.485	74.788	189.417	13.273	27.403
11	9	118.72	235.772	10.172	40.395	115.961	193.309	9.903	17.377				
12	10	98.306	214.359	9.996	14.533	144.302	202.385	9.76	44.348	69.469	214.312	10.984	33.722
13	11	101.222	217.181	10.047	17.282	140.27	201.052	9.782	40.318	70.356	210.157	10.988	31.339
14	12	104.098	220.263	10.073	20.726	136.245	199.733	9.798	36.284	71.235	206.017	11.018	29.391
15	13	106.964	223.278	10.084	24.336	132.201	198.404	9.809	32.283	73.009	197.712	11.042	27.091
16	14	109.884	226.494	10.091	28.31	128.16	197.078	9.826	28.358				
17	15	112.731	229.606	10.117	32.251	124.135	195.801	9.845	24.551	74.799	189.434	11.077	27.329
18	16	115.623	232.713	10.155	36.275								
20		aux murcia 1 152,3				aux sangonera 1 157,2				aux murcia 2 155,8			
		X	Y	Z	Dist	X	Y	Z	Dist	X	Y	Z	Dist
22	1	96.126	212.107	11.009	12.72	117.464	193.293	10.893	18.716	104.238	174.221	11.228	26.126
23	2	106.474	208.626	10.994	10.795	110.034	201.349	10.854	10.142	96.587	181.979	11.213	18.343
24	3	109.033	207.515	11.064	11.757	108.484	203.085	10.979	9.04	94.811	184.112	11.281	16.715
25	4	119.023	204.268	11.07	19.5	108.3	203.543	10.977	9.038	87.37	191.523	11.291	15.212

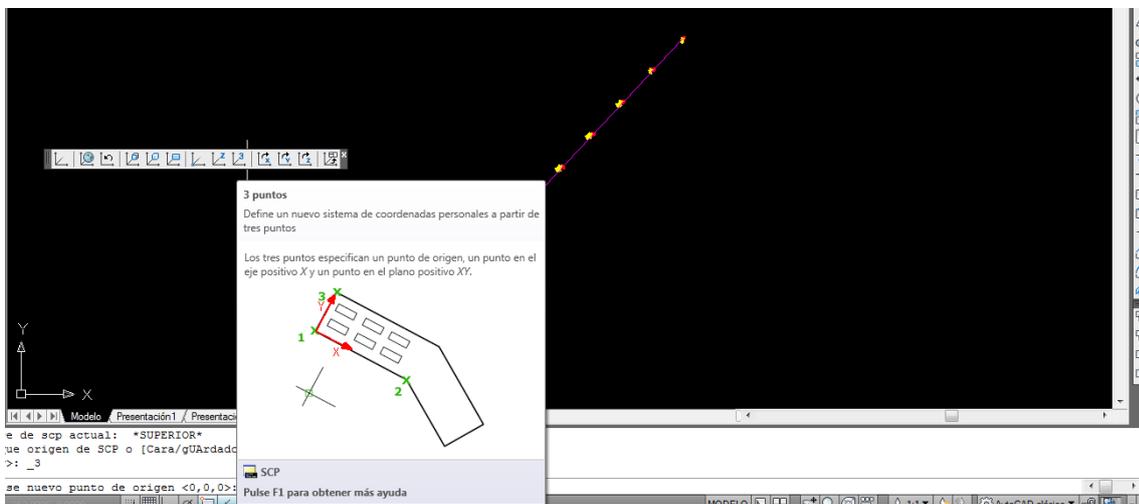
Al pasar estos puntos al AutoCAD podemos ir obteniendo nuestros primeros puntos. Estos puntos los haremos coincidir con nuestro archivo importado desde AutoCAD, para contrastar los datos obtenidos en campo con los que obtenemos en el programa. Y al ser puntos estratégico luego los utilizamos para empezar el diseño que iremos viendo paso a paso la construcción del mismo.



Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Una vez obtenido todos los datos tanto del Photomodeler como los obtenidos en campo y tenerlos todos los datos en una misma hoja de AutoCAD hacen las cosas muy fáciles, ya que empezamos haciendo coincidir los puntos de las tomas de datos con los puntos del Photomodeler y a partir de ellos construiremos el puente, cabe mencionar que también hemos cogido puntos de la separación de los arcos lo cual nos ayudara bastante para ver la separación entre arcos y el ángulo que tiene entre ellos.

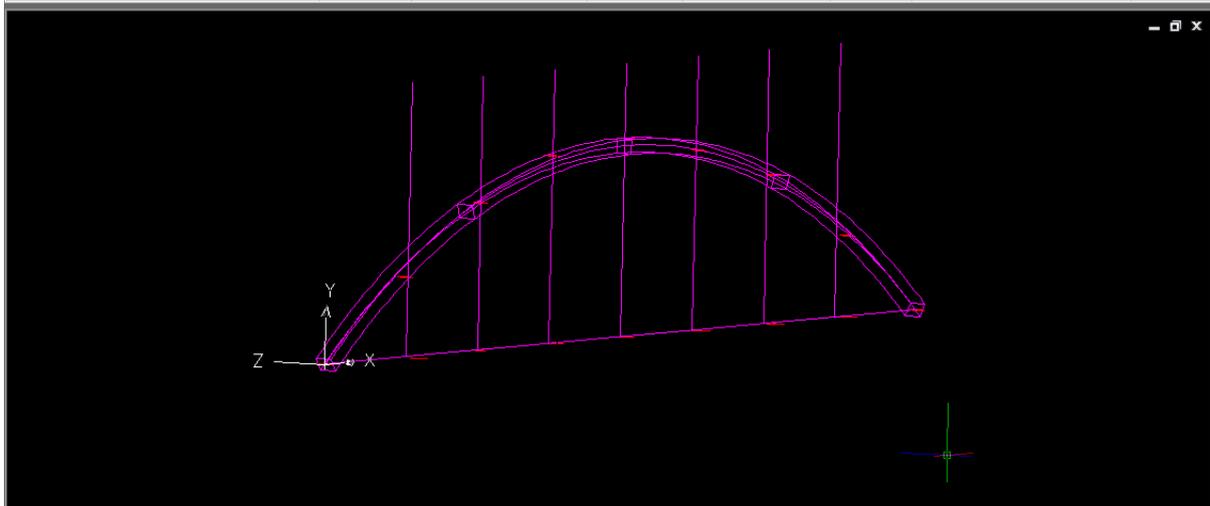
También necesitamos trabajar en un plano personalizado para ello utilizamos la siguiente herramienta:



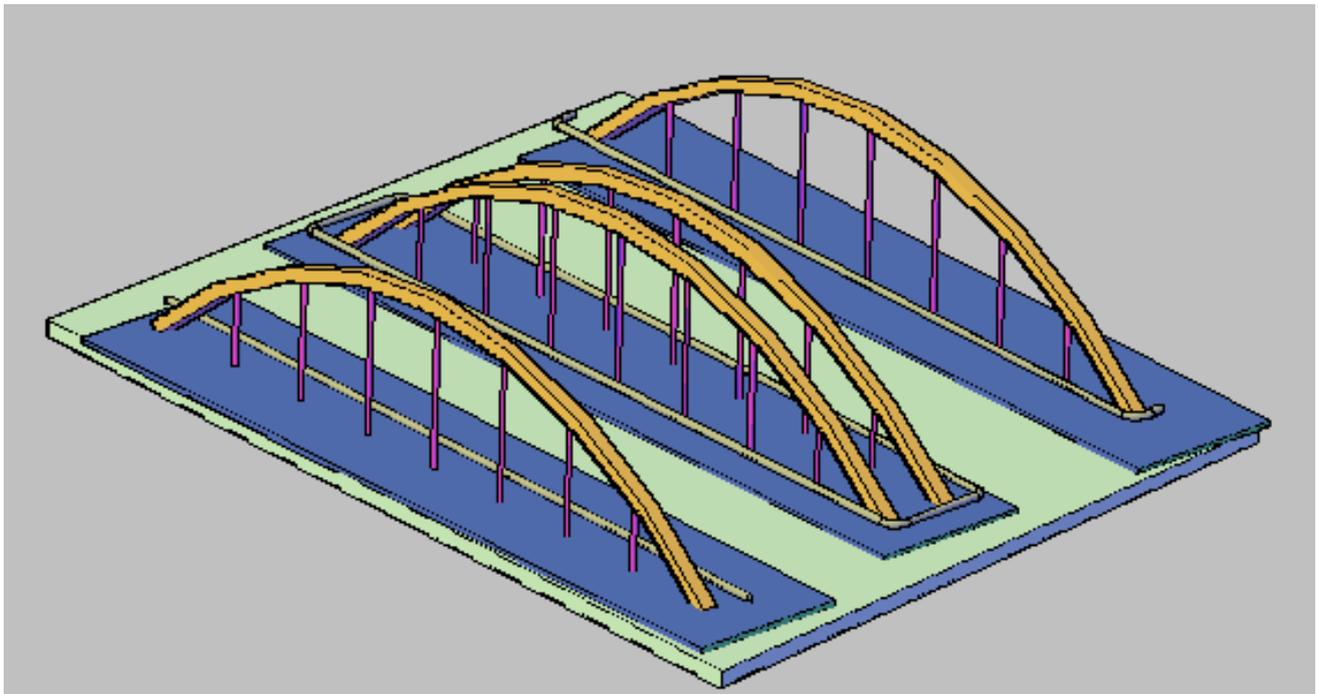
Para trabajar en un plano inclinado dándole la orden SCP sistema de coordenadas personales, en este campo damos valores a x y z para trabajar en un plano personalizado.

Una vez trabajando en el plano adecuado. Ayudándonos de herramientas como barre podemos empezar a darle forma a nuestro puente. Tenemos los puntos afines y el plano de trabajo. Construimos la viga central y los tubos de nuestro puente. Los tubos son de 10cms de diámetro y la viga es de 50X43.7cm respectivamente. Con estos datos y con la herramienta de barrer montamos la estructura del puente lo que nos va dando una vista más agradable de nuestro trabajo, ya va tomando forma de puente.

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde



Luego con un poco de recorte y con la ayuda de las capas podemos ir puliendo los detalles e ir obteniendo el resultado final con sus coordenadas correctas y con las dimensiones correctas, y ayudándonos de los puntos de separación podemos copiar el arco y llevarlo a los puntos de distancia para obtener el resultado final que vemos a continuación.



Capítulo 5

Bibliografía

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

5.1.- Bibliografía:

Historia de los puentes

http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_los_puentes

Los maestros

<http://puentes.galeon.com/magister/maestros.htm>

Tipos de puentes

<http://puentes.galeon.com/tipos/tiposdepons.htm>

Tutoriales Photomodeler

<http://www.photomodeler.com/tutorial-vids/online-tutorials.htm>

José Luis Lerma García. Fotogrametría moderna: Analítica y digital. Editorial universitat politècnica de València.

Luis Jáuregui. Apuntes. Universidad de los Andes.

José Ballester. La Virgen de la Fuensanta y su santuario del monte. 1972

Andrés de Sales Ferri. Santuarios marianos de Valencia y Murcia. Ediciones Encuentro.

pfc_modelado_3d_estaciondeferrocarril. Autor: Libertad Soro Pérez.

Libro Topografía. García, A., Rosique, M.F. y Torres, M. (UPCT)

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde

Modelado en 3D mediante Fotogrametría de puente en Sangonera la Verde
