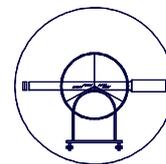


APUNTES

“**TOPOGRAFÍA Y GEODESIA**”

UNIDAD DIDÁCTICA IV
FOTOGRAMETRÍA

Profesor Responsable:
Julio Manuel de Luis Ruiz.



UNIDAD DIDÁCTICA IV

FOTOGRAMETRÍA

1. INTRODUCCIÓN A LA FOTOGRAMETRÍA

1.1. DEFINICIÓN Y ASPECTOS GENERALES

1.1.1. Definición

1.1.2. Fotogrametría y fotointerpretación

1.1.3. Diferencias entre fotografía aérea y mapa

1.1.4. Ventajas de la fotografía como fuente de información

1.1.5. Antecedentes históricos

1.2. EL PROCESO FOTOGRAMÉTRICO

1.2.1. La cámara métrica

1.2.2. Controles generalizados en las cámaras métricas

1.2.3. Emulsiones tipo y características principales

1.2.4. Soportes de emulsión

1.2.5. El proceso fotográfico

1.2.6. Calidad de la imagen fotográfica

1.3. CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DE UN FOTOGRAMA AISLADO

1.3.1. Concepto de escala

1.3.2. Explotación gráfica de un fotograma aéreo

1.4. LA ESTEREOSCOPIA

1.4.1. La visión estereoscópica

1.4.2. El par estereoscópico

1.5. LA FOTOINTERPRETACIÓN

1.5.1. Aspectos significativos

1.5.2. Interpretación del relieve

1.5.3. Elementos de geografía humana

1.6. LA ORTOFOTOGRAFÍA

1.7. APLICACIONES DE LA FOTOGRAMETRÍA

1.7.1. Aplicaciones topográficas

1.7.2. Aplicaciones en ingeniería civil

1.7.3. Aplicaciones no topográficas

2. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES Y EL MÉTODO GENERAL DE LA FOTOGRAMETRÍA

2.1. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LA FOTOGRAMETRÍA

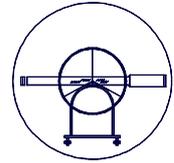
2.1.1. Haz perspectivo

2.1.2. Definición de un haz perspectivo por sus datos internos

2.1.3. Determinación de la posición en el espacio de un haz

2.1.4. Identificación de rayos homólogos

2.1.5. Restitución



2.2. MÉTODO GENERAL DE LA FOTOGRAMETRÍA

2.2.1. Introducción

2.2.2. Orientación interna y externa

2.2.2.1. Orientación interna

2.2.2.2. Orientación externa

3. RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA

3.1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE GEORREFERENCIACIÓN

3.2. CONTRIBUCIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA A LA CAPTURA DE INFORMACIÓN
GEORREFERENCIADA

3.2.1. Restitución analógica

3.2.2. Restitución numérica

3.2.3. Restitución analítica

3.3. LA RESTITUCIÓN DIGITAL

3.3.1. Tratamiento digital de la imagen

3.3.2. La restitución digital

3.3.3. La ortoimagen digital

4. ACTIVIDADES FOTOGRAMÉTRICAS

4.1. ESQUEMA GENERAL

4.2. EL PROYECTO DE VUELO

4.3. APROXIMACIÓN DE COSTES

5. FOTOGRAMETRÍA TERRESTRE CON CÁMARAS MÉTRICAS

5.1. INTRODUCCIÓN

5.2. LA TOMA FOTOGRÁFICA

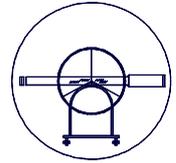
5.3. PRINCIPALES RELACIONES DE SEMEJANZA

5.4. EVALUACIÓN DE ERRORES Y SU INFLUENCIA PARA PROYECTAR TOMAS
FOTOGRÁFICAS

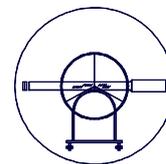
5.5. APLICACIONES CARACTERIZADAS

5.5.1. Catedral de Calahorra

5.5.2. Iglesia de los Jesuitas (Santander)



1. INTRODUCCIÓN A LA FOTOGRAMETRÍA



1.1. DEFINICIÓN Y ASPECTOS GENERALES

1.1.1. DEFINICIÓN

Etimológicamente, la palabra fotogrametría significa la métrica de lo escrito con luz. Es, en esencia, la ciencia que utiliza la fotografía para hacer medidas, y su aplicación es extensiva a numerosas áreas de conocimiento.

Según Bonneval, la fotogrametría es la técnica cuyo objetivo es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando medidas hechas sobre una o varias fotografías.

1.1.2. FOTOGRAMETRÍA Y FOTOINTERPRETACIÓN

El empleo de las fotografías aéreas de eje vertical puede utilizarse de dos formas diferenciadas:

- Fotointerpretación: Estudio pormenorizado de las fotografías con el objetivo de analizar fenómenos de muy variada tipología.
- Fotogrametría: Técnica para realizar mapas y planos a partir de las fotografías de eje vertical.

1.1.3. DIFERENCIAS ENTRE FOTOGRAFÍA AÉREA Y MAPA

Las fotografías aéreas de eje vertical son resultado de una perspectiva cónica, estando sujetas a unos condicionantes geométricos que impiden su empleo como mapa pero que le complementa de una forma muy eficaz.

Las diferencias fundamentales entre un mapa y una fotografía son las siguientes:

A) Diferencia de contenido.

- La cantidad de información en una fotografía es infinita y en un mapa limitada.
- En la fotografía la información no está jerarquizada, en el mapa sí, y además se puede añadir simbología adicional, toponimia, etc.
- La fotografía presenta una información integral y objetiva, mientras que el mapa está confeccionado siguiendo ciertas reglas. La información es subjetiva.

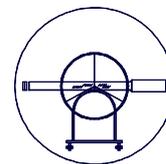
B) Diferencias cuantitativas.

- El mapa es una proyección plana mientras que la fotografía es una perspectiva, no configurando un documento con propiedades métricas.
- No proporciona una información numérica fiable y la información altimétrica no existe a nivel de fotograma aislado.

1.1.4. VENTAJAS DE LA FOTOGRAFÍA COMO FUENTE DE INFORMACIÓN

Una fotografía es la imagen permanente de un determinado objeto, obtenida por la acción de la luz sobre un soporte y ofrece una serie de ventajas:

- Se obtienen representaciones completas de los objetos, información objetiva y el registro es instantáneo.



- Material relativamente económico, existiendo facilidad en la manipulación y conservación del mismo.
- Posibilidad de tratar objetos en movimiento y de pasar a imagen digital mediante escaneado.
- El proceso de toma de información y el posterior de medida no perturban el objeto a estudiar.
- Gran rendimiento cuando se trata de grandes extensiones de superficie.

1.1.5. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La fotografía fue inventada en 1828 por Niepce. Las primeras fotografías aéreas fueron tomadas desde un globo en 1855 por Tournachon, fotógrafo de París, que usaba el nombre de Nadar. Por esa época las placas impresionadas debían ser reveladas inmediatamente, hasta que en 1880 aparecieron las emulsiones al gelatinobromuro. Pero la aeronáutica no experimentó ningún avance en esa época. Con la aparición del dirigible aumentaron las posibilidades del empleo eficaz de la fotografía aérea, que fue absoluta con la aparición del avión.

Fechas con marcada significación de avance:

- . 1914: Utilización con fines de reconocimiento.
- . 1925: Película de rollo continuo.
- . 1930: Nuevas emulsiones.
- . 1939: Gran desarrollo de la fotointerpretación.
- . 1960: Fotografía desde satélites artificiales.

1.2. EL PROCESO FOTOGRAMÉTRICO

1.2.1. LA CÁMARA MÉTRICA

Las fotografías usualmente empleadas como base de información son tomadas por cámaras de gran formato, similares en funcionamiento a las normales, con la salvedad de que en ellas se pueden determinar con precisión sus elementos internos. La cámara métrica se compone de los siguientes elementos:

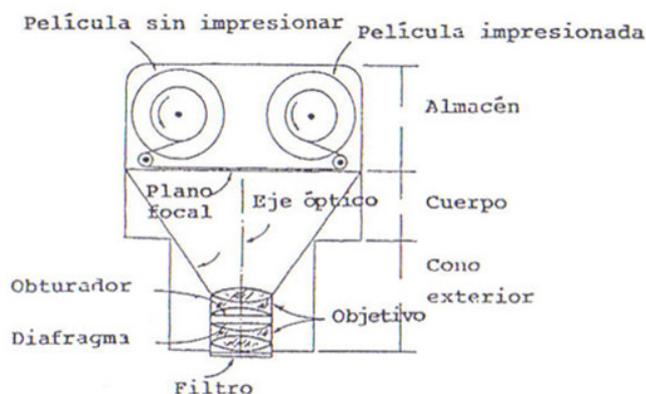
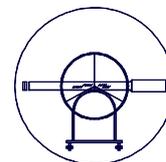


Figura Número 1.- Esquema de cámara métrica



A.- Objetivo

Es la parte óptica de la cámara, tiene por misión lograr que los rayos luminosos se junten en el centro del objetivo. Puede considerarse como el vértice de la proyección y contiene o define los siguientes elementos:

- Distancia focal: Es la distancia desde el centro óptico del objetivo hasta el plano focal, donde se ubica la placa con material sensible a la luz. Se consideran objetivos normales los que tienen una distancia focal aproximada a la diagonal del cliché que impresionan.
- El obturador: Mecanismo que mantiene cerrado el objetivo para que entre la luz en el momento deseado.
- El diafragma: Permite al operador graduar la abertura del objetivo. Tiene por misión limitar la cantidad de luz que llega al plano focal.

Los lentes de los objetivos se clasifican según su campo en:

	Campo (2α)	Focal
Angulo pequeño	60°	~ 300 mm.
Angulo normal	80°	~ 200 mm.
Gran angular	90°	~ 150 mm.
Súper gran angular	120°	~ 88 mm.

Pudiéndose deducir fácilmente $\alpha = \arctg \frac{162}{f}$ de la siguiente figura

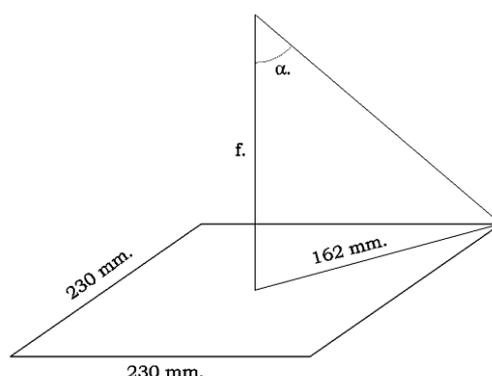
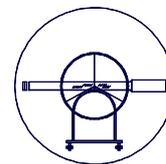


Figura Número 2.- Expresión gráfica de la relación fundamental

B.- Cono interior

Mantiene el conjunto de lentes solidario con la superficie superior del cono, que coincide con la del plano focal. Además de la impresión fotográfica del terreno, en un cliché fotogramétrico hay otras informaciones que quedan impresas mediante un sistema auxiliar de iluminación sincrónica con la apertura del obturador. Son las siguientes:



- Marcas fiduciales para definir el punto principal.
- Altitud registrada en un altímetro barométrico.
- Inclinación aproximada del eje principal, dado por un nivel esférico.
- Número y tipo de la cámara.
- Distancia principal.
- Hora dada por la fotografía de un reloj.
- Número de la fotografía dada por un sistema numerador que avanza una unidad en cada exposición. Tiene cuatro dígitos.
- Lugar para anotaciones (en la cámara, antes de comenzar el vuelo). Puede haber alguna información más si la cámara lleva acoplado algún aparato auxiliar.

C.- Plano focal

Es el definido por las marcas o señales fiduciales materializadas en la parte superior del cono interior y situado, por construcción, a una distancia igual a la principal de la pupila de salida del objetivo.

D.- Cono exterior y cuerpo de cámara

Tienen como misión soportar el cono interior, mantener la parte del motor y servir de apoyo al almacén de material fotosensible.

E.- Motor

Proporciona la energía necesaria para abrir y cerrar el obturador, operar el sistema de vacío para asegurar la planeidad de la película y deslizar ésta de una exposición a otra. Un ciclo completo de trabajo comprende:

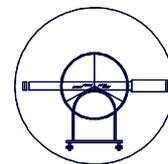
- Desconectar el sistema de vacío.
- Avance de la película.
- Conexión del sistema de vacío.
- Iluminación del sistema auxiliar para información complementaria.
- Apertura del obturador.
- Cierre del obturador.

La frecuencia de este ciclo depende de la velocidad del avión, la altura de vuelo y el recubrimiento longitudinal.

F.- Almacén

Sus funciones son:

- Guardar en recipiente hermético la película expuesta y en otro la que esta sin exponer.
- Hacer avanzar la película la longitud adecuada entre dos exposiciones.
- Alojar el mecanismo de planeidad.



Con el formato 23x23 cm., un almacén guarda un rollo de 120 m. de película, que permite hacer 475 exposiciones.

A medida que la película va pasando del rollo no impresionado hacia el impresionado, va haciendo girar una ruedecilla deslizante que mueve un contador digital para informar en todo momento de la cantidad de película que queda. Este mismo mecanismo tiene a su cargo la indicación de avance de película a cada cierto número de vueltas de la ruedecilla.

1.2.2. CONTROLES GENERALIZADOS EN LAS CÁMARAS MÉTRICAS

A.- Cuadrícula

A efectos de estudiar y tener en cuenta las deformaciones sufridas por el material desde su exposición hasta su utilización en la restitución, puede incorporarse a la fotografía una cuadrícula de precisión en el momento de la exposición. Puede hacerse con una placa ante el material negativo con las cruces grabadas en la superficie superior o mediante una placa similar colocada por detrás e impresionada a través del soporte de la emulsión.

B.- El calibrado de las cámaras métricas

Una vez que el fabricante ha controlado independientemente cada componente y los ha montado formando la cámara métrica, el conjunto debe calibrarse para determinar las características métricas que comprenden los parámetros internos que hacen posible la reconstrucción de los haces y algunos más. Esta operación debe repetirse a intervalos regulares.

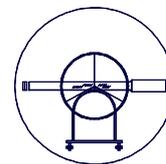
Los resultados de un proceso de calibrado son los siguientes:

- Distancia focal del objetivo.
- Posición del punto principal respecto a las marcas fiduciales.
- Distorsiones radial y tangencial.
- Planeidad del plano focal materializado por las marcas fiduciales.
- Posiciones relativas o distancia entre las marcas fiduciales.

Si la cámara tiene cuadrícula de fondo también se proporcionan las posiciones de los cruces respecto al sistema fiducial.

1.2.3. EMULSIONES TIPO Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

La película está formada por un soporte semirrígido de celuloide sobre una de cuyas superficies se ha extendido una capa de emulsión. La otra superficie está recubierta por un material opaco denominado antihalo. La emulsión está compuesta básicamente por una mezcla de halogenuros de plata. Las emulsiones más utilizadas son las de gelatina-bromuro de plata. En esencia, es una suspensión en gelatina de pequeños cristales de bromuro de plata (95%) y de yoduro de plata (5%). La medida del ennegrecimiento de un negativo revelado se realiza por medio del concepto de densidad.



La velocidad de impresión de la emulsión está directamente relacionada con el tamaño del grano, que determina, en cierta medida, la sensibilidad de la película. Las emulsiones se clasifican de la siguiente forma:

- Ordinarias: Sensibles azules y violetas.
- Ortocromáticas: Sensibles hasta el amarillo.
- Pancromáticas: Sensibles a todo el espectro visible.
- Infrarroja próxima: Sensibles hasta $\lambda=0,95 \mu$
- Infrarroja lejana: Sensibles hasta $\lambda=1,25 \mu$

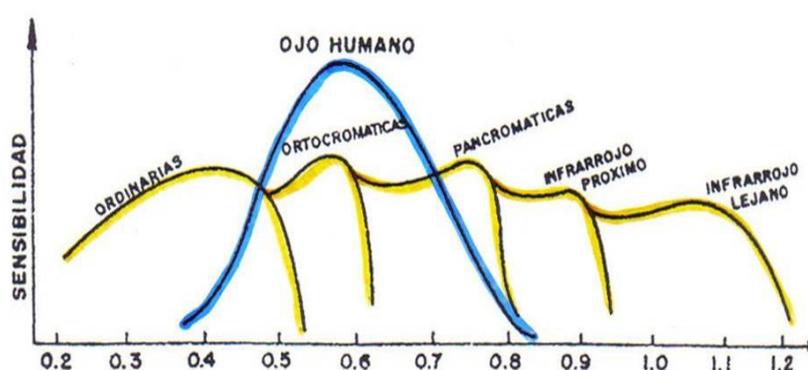
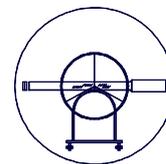


Figura Número 3.- Tipos de emulsión

En los últimos años se ha ampliado el panorama de captar información fuera del espectro visible, desarrollándose el campo de los rayos infrarrojos. Existen emulsiones de color sensibles a las radiaciones infrarrojas. Se obtienen sustituyendo la capa sensible superior por otra especial, obteniendo una imagen de color muy diferente a los colores naturales (falso color). Son muy utilizados en hidrología, edafología y cubiertas vegetales. En la actualidad se utilizan cámaras multispectrales para captar de forma simultánea tres o más imágenes protagonizadas por radiaciones de distinta longitud de onda, que pueden tratarse analíticamente para explotar de forma más completa la información captada.

No existe ninguna emulsión cuya sensibilidad se asemeje a la del ojo humano, pero con el empleo de filtros coloreados puede acercarse la sensibilidad de una emulsión a la del ojo. Las características más importantes de las emulsiones pueden agruparse en los siguientes apartados:

- Velocidad de una emulsión: De ella depende el tiempo de exposición. Así, la velocidad se introduce en el exposímetro, que al medir la iluminación proporciona el tiempo de exposición. En fotogrametría aérea se usan emulsiones de gran velocidad pues las exposiciones son muy breves y la luz es muy escasa.
- Finura de una emulsión: La capacidad de representar o reproducir objetos muy pequeños está relacionada con la finura o grano de la emulsión, que depende, sobre todo, de su estructura, es decir, el poder separador (líneas/mm) de una emulsión, depende de su finura o de su grano.



Haciendo un pequeño esquema, resulta:

EMULSIONES	GRANOS	IMÁGENES	PODER SEPARADOR
Rápidas	Grueso	Poco finas	Pequeño
Lentas	Fino	Muy final	Grande

Aquí se ve la gran contradicción del material fotográfico para uso fotogramétrico, ya que por las condiciones de toma hay que utilizar emulsiones muy rápidas, pero para su uso métrico es necesario un gran poder separador.

1.2.4. SOPORTES DE EMULSIÓN

Las bases o soportes pueden ser de dos tipos diferentes:

A.- Placas de vidrio

Existían de espesor de cerca de 3 mm., son prácticamente indeformables y se usan para trabajos de mucha precisión, sobre todo en fotogrametría terrestre. Sus ventajas eran:

- Fácil manipulación y muy pequeñas deformaciones.
- Muy buena planeidad y posibilidad de revelado individual.
- Conservación ilimitada.

Sus inconvenientes eran:

- Ocupan mucho espacio y son muy frágiles.
- Son difíciles de emplear en vuelo.

B.- Película

Constituída por materiales sintéticos (acetatos, PVC, ...) en los que se pueden escoger espesor, transparencia, estabilidad, etc. El espesor es de 0,13 – 0,14 mm. para fotogrametría aérea. Estos soportes son de poliéster y son casi tan estables como las placas; si presentan deformaciones, éstas aparecen como isótropas.

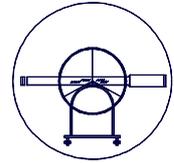
Orden de magnitud de estas deformaciones:

- Placas: 0,03 ‰
- Películas triacetato: 1 ‰
- Película poliéster: 0,1 ‰

Su forma geométrica no es constante como las placas pues:

- Se fabrican por estirado y se disponen en rollos.
- Han de ser planos en la exposición.
- Vuelven a ser rollos después del revelado.
- Han de volverse otra vez planos en la restitución.

Toda variación de forma trae consigo inmediatamente una deformación de los haces perspectivos que se reconstruyen sobre las fotografías.



Sus ventajas:

- Ligereza (de mucho valor en fotogrametría aérea).
- Abultan poco y resisten muy bien a los golpes.
- Se almacenan fácilmente.

Sus inconvenientes:

- Dificultades de conseguir perfecta planeidad.
- Manipulación más delicada que las placas.
- El revelado ha de ser hecho en serie.
- Exigen un condicionamiento más estricto que las placas.

1.2.5. EL PROCESO FOTOGRÁFICO

El proceso fotográfico básicamente puede esquematizarse de la forma siguiente:

- El objetivo forma una imagen óptica sobre la emulsión.
- La energía transportada por la radiación forma una imagen latente, quedando afectado mayor cantidad de bromuro de plata (según la iluminación).
- El revelado hace visible la imagen latente, dejando la plata metálica (granos negros) en la parte afectada, formándose así un negativo, tanto más oscuro cuando más iluminado.
- El fijado elimina las sales de plata no afectadas por la luz.
- El lavado arrastra las sales disueltas.
- El secado elimina el agua.

1.2.6. CALIDAD DE LA IMAGEN FOTOGRÁFICA

La calidad de la imagen depende de multitud de factores, entre los que destacan:

A. - El objeto fotografiado y el medio

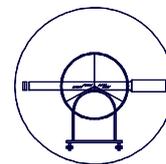
- Reparto y contraste de la iluminación.
- Longitud de onda de las radiaciones.
- Tipo y cantidad de atmósfera interpuesta.

B.- El objetivo

- Distancia focal.
- Aberraciones residuales.
- Abertura.
- Tiempo de exposición.

C.- La emulsión y su tratamiento

- Naturaleza y estructura.



- Espesor y tipo de soporte.
- Tiempo de revelado. Temperatura.

1.3. CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DE UN FOTOGRAMA AISLADO

Tanto en fotointerpretación como en fotogrametría se emplean fotografías verticales obtenidas en un vuelo fotogramétrico. En el vuelo fotogramétrico se van obteniendo las fotografías de eje vertical dotadas de un recubrimiento que las hacen activas desde el punto de vista estereoscópico.

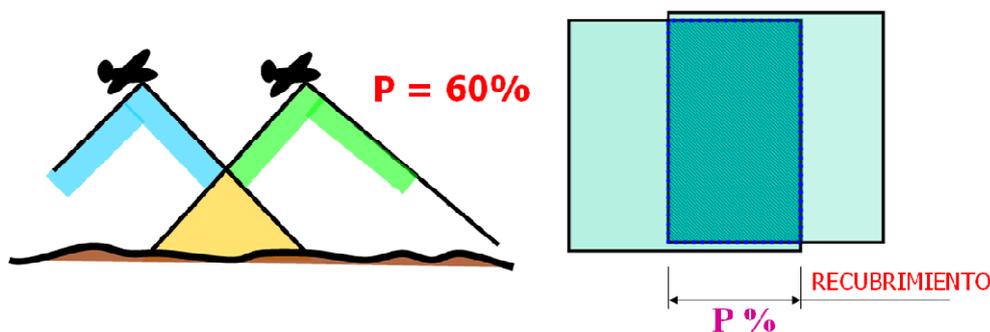


Figura Número 4.- Recubrimiento longitudinal

Los fotogramas aéreos verticales tienen, usualmente, un formato de 23x23 cm. y el recubrimiento longitudinal suele ser del 60%. En el caso de geometría perfecta se puede obtener la superficie real recubierta en una pasada, en un caso genérico.

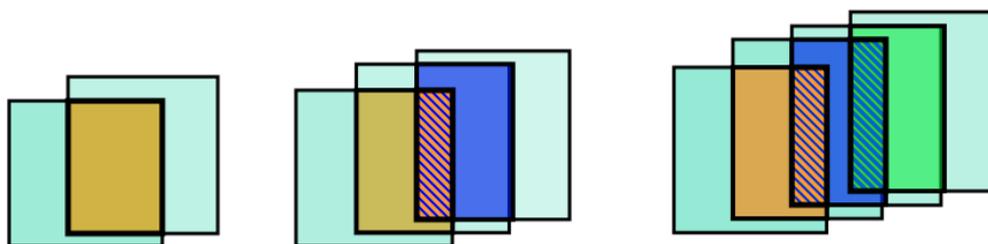
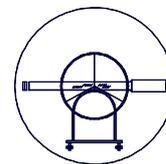


Figura Número 5.- Fotografías necesarias para recubrir longitudinalmente una zona

Denominando P al recubrimiento longitudinal en tanto por ciento, resulta:

- Dos fotografías: $2 \dots l_2 = \frac{P}{100} L$
- Tres fotografías: $3 \dots l_3 = \frac{P}{100} L + \frac{100 - P}{100} L$
- Cuatro fotografías: $4 \dots l_4 = \frac{P}{100} L + 2 \frac{100 - P}{100} L$
- N fotografías: $N \dots l_N = \frac{P}{100} L + (N - 2) \frac{100 - P}{100} L$



obteniéndose la relación general:

$$l_N = \frac{L}{100} [P + (N - 2)(100 - P)]$$

El avión vuela la zona a fotografiar en sucesivas pasadas, cubriendo todo el territorio deseado, fijando los pares estereoscópicos para su interpretación simple o estereoscópica.

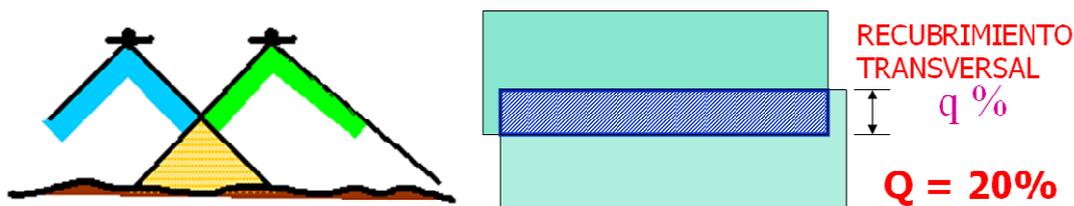


Figura Número 6.- Recubrimiento transversal

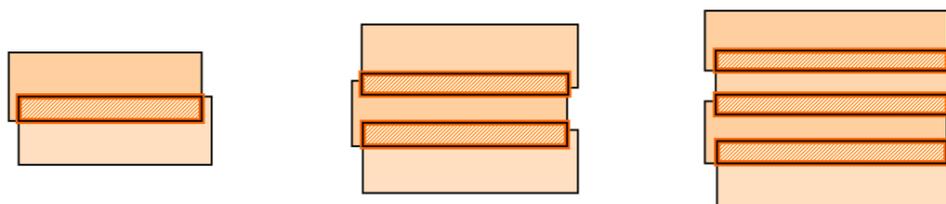


Figura Número 7.- Fotografías necesarias para cubrir transversalmente una zona

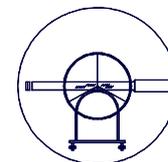
Los fotogramas aéreos verticales tienen usualmente un recubrimiento transversal del 20%. En el caso de geometría perfecta se puede obtener la superficie recubierta transversalmente en M pasadas.

Denominando q al recubrimiento transversal, en tanto por ciento, resulta:

- Dos pasadas: $l_2 = L \cdot \left[1 + \frac{100 - q}{100} \right]$
- Tres pasadas: $l_3 = L \cdot \left[1 + 2 \frac{100 - q}{100} \right]$
- Cuatro pasadas: $l_4 = L \cdot \left[1 + 3 \frac{100 - q}{100} \right]$
- M fotografías: $l_M = L \cdot \left[1 + (M - 1) \frac{100 - q}{100} \right]$

obteniéndose la expresión general:

$$l_M = L \cdot \left[1 + (M - 1) \frac{100 - q}{100} \right]$$



La zona que debe fotografiarse deber ser totalmente recubierta si se quiere explotar estereoscópicamente el documento obtenido.

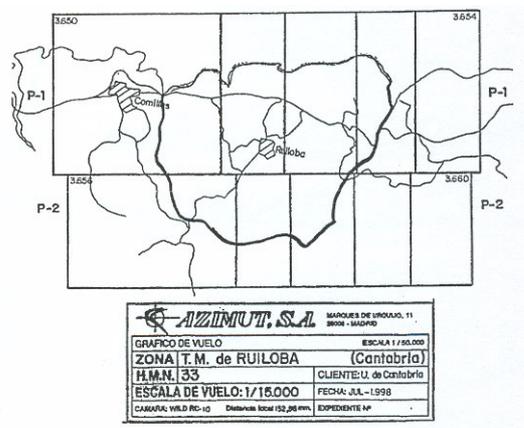


Figura Número 8.- Esquema del vuelo

Una fotografía vertical aislada está referenciada a un sistema cartesiano definido por las marcas fiduciales. El origen de coordenadas (centro hipotético de la foto) se denomina punto principal. El eje óptico (recta perpendicular al plano de la imagen trazada por el vértice) corta al mencionado plano en el punto principal.

Las coordenadas fotográficas, usualmente conocidas como fotocoordenadas, se evalúan con instrumentos denominados comparadores, que se clasifican en monocomparadores (observación binocular de una foto), o estereocomparadores (observación binocular de dos fotos).

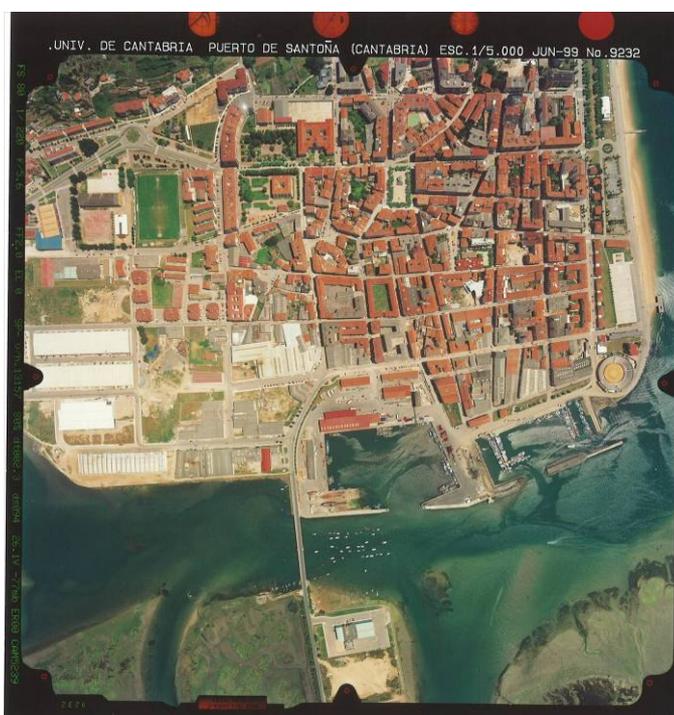
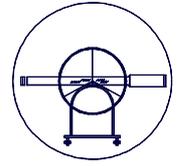


Figura Número 9.- Caracterización de una foto vertical aislada



Además del espacio que ocupa la fotografía propiamente dicha, en cada fotograma hay un recuadro con la siguiente información esencial:

- Distancia focal de la cámara métrica expresada en milímetros, así como marca y modelo.
- Un nivel esférico para comprobar la verticalidad de la foto.
- Un altímetro que marca la altura del avión sobre el nivel del mar.
- La escala aproximada de la fotografía.
- Un reloj con segundero que informa de la hora en que se hizo la foto.
- Un contador automático sincronizado con la máquina de arrastre de la película.

Hay unos espacios para colocar marcas especiales: fecha, nombre de la zona, empresa que realizó el vuelo, propiedad de las fotos, etc.



Figura Número 10.- Información adicional de una foto vertical

1.3.1. CONCEPTO DE ESCALA

El concepto de escala no es aplicable con absoluta precisión a una fotografía aérea de eje vertical. En una primera aproximación tan solo se puede hablar de escala para segmentos horizontales.

Esta circunstancia limita las posibilidades métricas de una fotografía como documento de trabajo. La escala es una función de cada punto. Cada imagen tiene una escala fotográfica, tanto mayor cuanto más alto, tanto menor cuando más bajo sea el punto imagen del terreno.

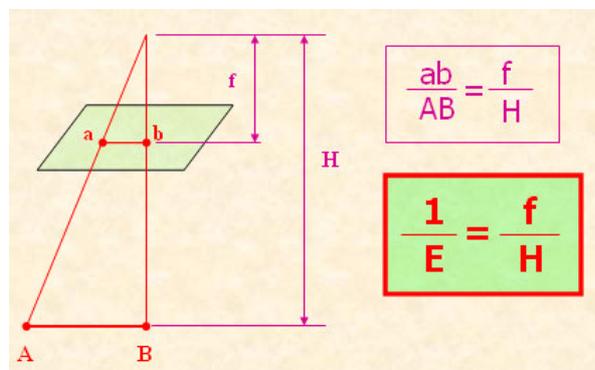
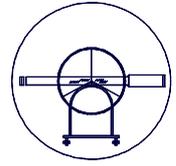


Figura Número 11.- Escala de una fotografía aérea

Mientras que f es una constante muy bien definida, H varía continuamente en un terreno no horizontal, lo que dificulta el conocimiento de la escala.



1.3.2. EXPLOTACIÓN GRÁFICA DE UN FOTOGRAMA AÉREO

Conociendo la imagen completa de un detalle vertical en un fotograma puede calcularse su altura real, siempre que el punto más bajo esté incluido en el plano de referencia. El fundamento del proceso está basado en la evaluación del desplazamiento, en la propia foto, que experimentan los dos puntos significativos del detalle vertical: el punto en el terreno y el punto extremo superior.

El detalle vertical, de altura h (CD) tiene su representación en la fotografía, según una recta concurrente en el punto principal cuyo pie y cabeza distan del punto principal una distancia m y n , respectivamente.

Si el detalle vertical fuese la arista de un edificio, la imagen en la fotografía de eje vertical sería:

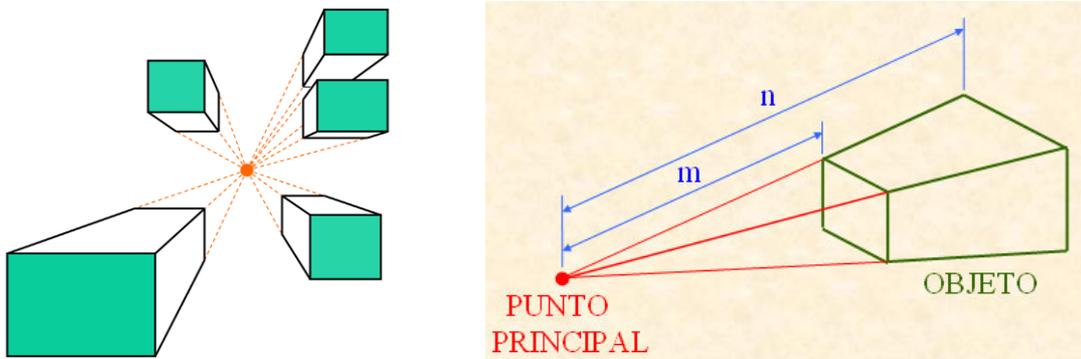


Figura Número 12.- Explotación numérica de un fotograma aislado

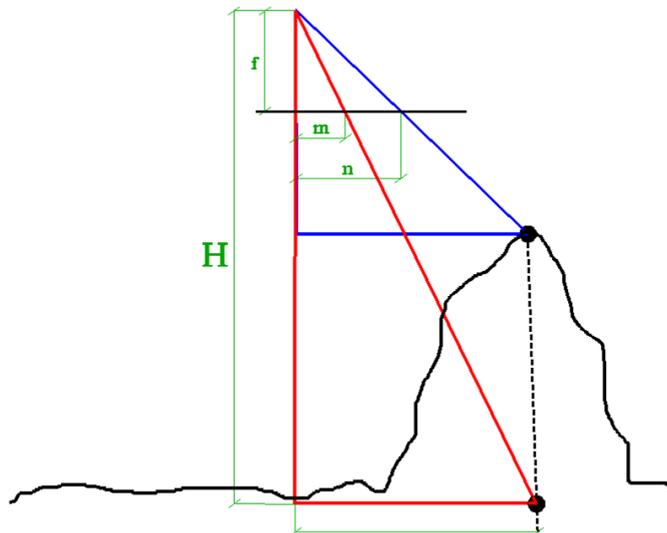
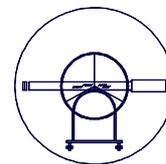


Figura Número 13.- Origen en la medición de distancias

Entre los datos del terreno y los fotogramas pueden establecerse las siguientes relaciones:

$$\frac{DC}{FP} = \frac{CE}{PE} = \frac{cd}{Nd}$$



$$\frac{h}{H} = \frac{n-m}{n} \qquad h = \frac{n-m}{n} \cdot H$$

o bien, como:

$$\frac{1}{E} = \frac{f}{H} \qquad H = f \cdot E \qquad h = \frac{n-m}{n} \cdot f \cdot E$$

siendo:

- h = altura real del detalle vertical
- n y m = distancias evaluadas en la fotografía
- f = distancia focal de la cámara
- E = denominador de la escala de la foto
- H = altura de vuelo

En un fotograma aislado, las sombras de los detalles verticales son paralelas. Los rayos solares concurren en un punto S denominado punto de fuga de los rayos solares. La forma más general de resolver los problemas de sombras es utilizar los conceptos perspectivas.

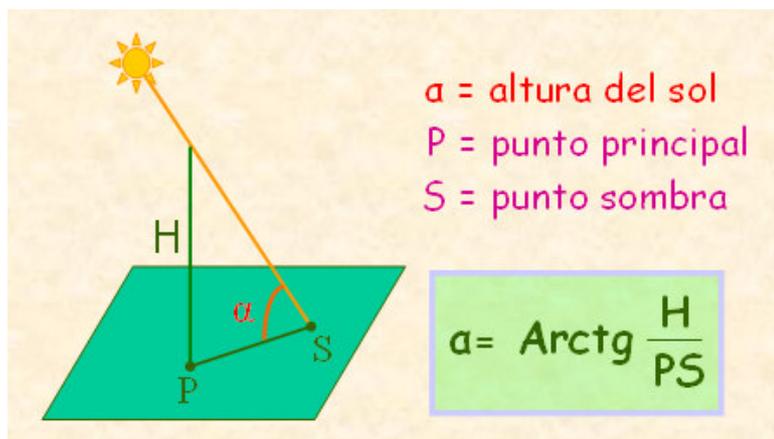


Figura Número 14.- Sombras en un fotograma aislado

1.4. LA ESTEREOSCOPIA

1.4.1. LA VISIÓN ESTEREOSCÓPICA

Se basa en la propiedad humana de apreciar el relieve en visión binocular para lo que es preciso obtener dos imágenes, una por cada ojo, que se unen en el cerebro según un proceso fisiológico-mental. Se han de cumplir dos condiciones:

- Cada ojo ha de ver sólo su perspectiva.
- Las direcciones de visión se deben intersectar.

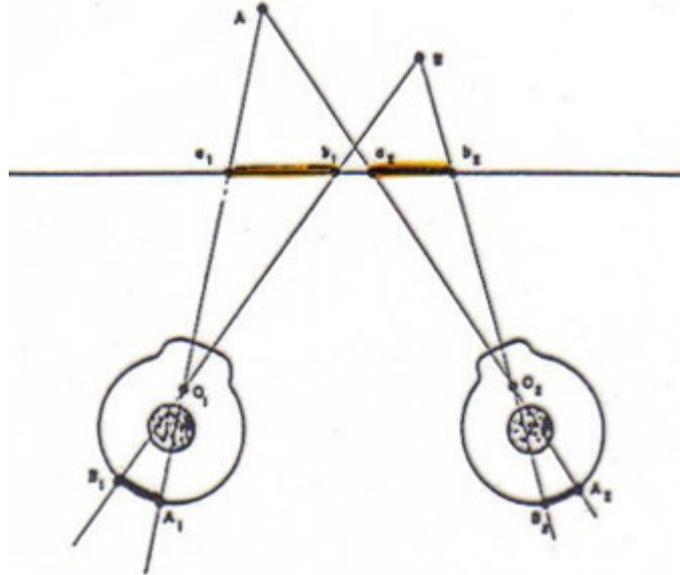
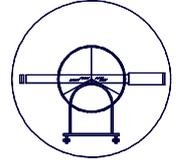


Figura Número 15.- Estereoscopia natural

Si se observa un par estereoscópico reproduciendo las condiciones de su obtención, colocando la parte común del par de tal forma que cada ojo estuviese posicionado frente a cada fotograma, a una distancia igual a la focal y con una separación igual a la que existía entre las dos posiciones del avión en el instante de ejecutar los disparos, se percibiría la sensación estereoscópica.

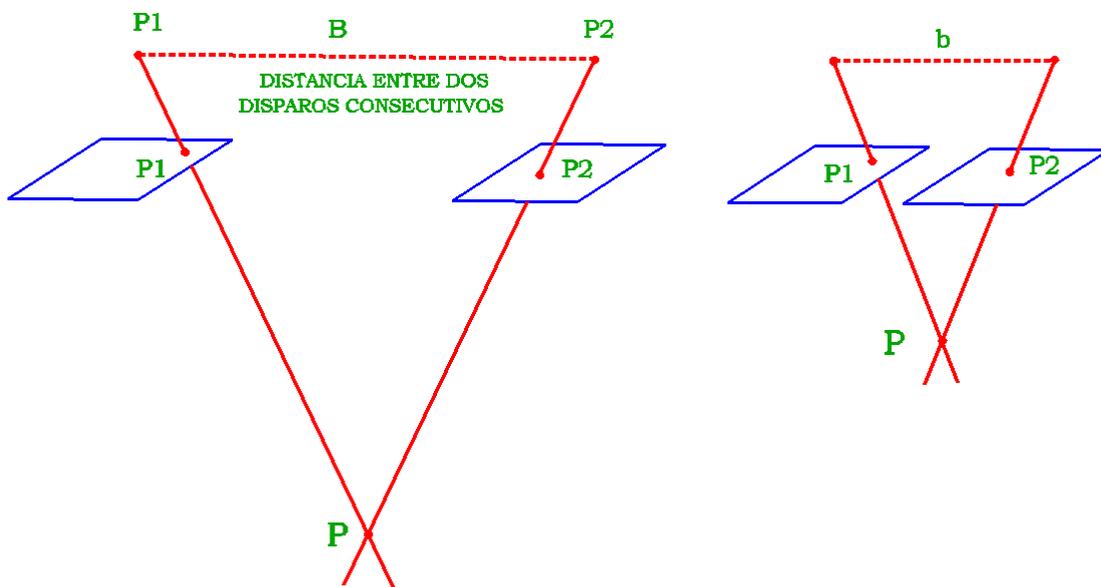


Figura Número 16.- Paralelismo entre obtención y uso de un par estereoscópico

En condiciones normales, la distancia b es la distancia interpupilar, pero la observación es difícil. Para conseguir una visión estereoscópica perfecta se emplea el estereoscopio.

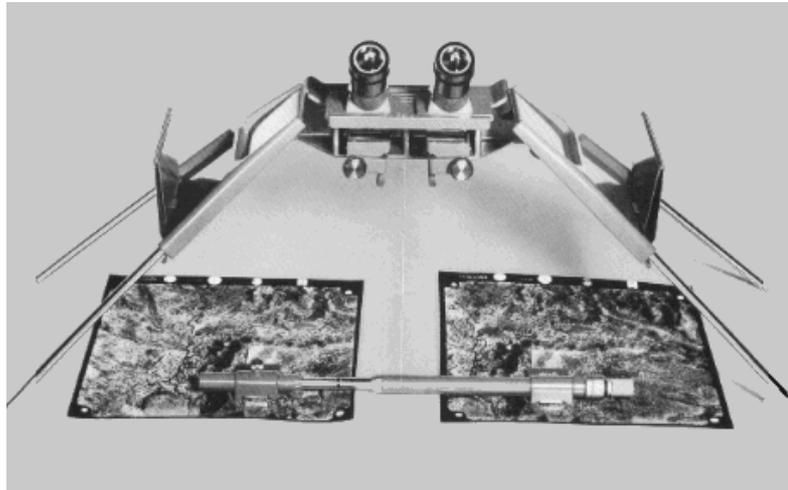
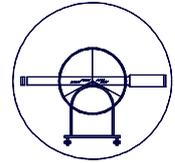


Figura Número 17.- Estereóscopo de espejos

El estereóscopo de espejos aumenta la distancia interpupilar, siendo el apropiado para trabajos de gabinete. Adosando lentes complementarias aumenta la sensación de relieve, aunque disminuye el campo observado. La sensación de relieve, exagerado por este procedimiento, se denomina hiperestereoscopia. Si las fotografías se colocan cambiadas de posición se produce una sensación óptica de inversión del relieve, denominada pseudoestereoscopia, que representa al terreno con el punto de vista cambiado.

Otro sistema usual de conseguir efectos estereoscópicos es el anaglifo, basado en dotar al soporte con dos colores complementarios (rojo-verde) y observar al conjunto con filtros de esos mismos colores.

1.4.2. EL PAR ESTEREOSCÓPICO

Dos fotografías consecutivas de una pasada configuran un par estereoscópico, que permiten las posibilidades métricas de la fotografía. Se denomina paralaje estereoscópico al desplazamiento aparente en la posición de un objeto fijo causado por el movimiento del observador.

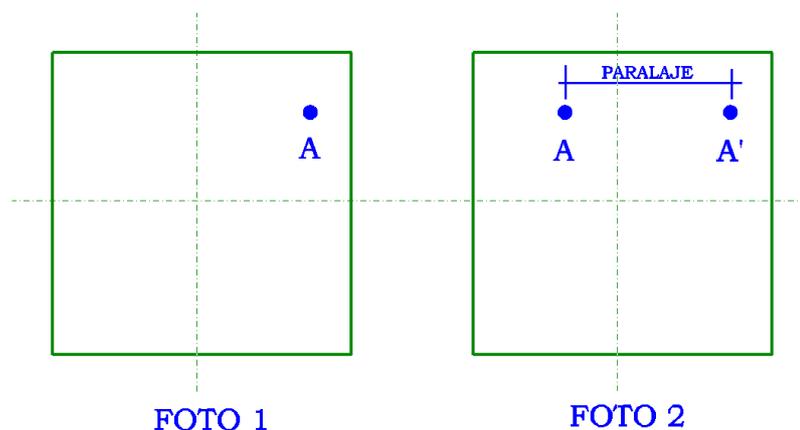
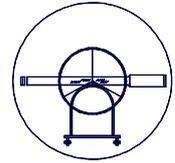


Figura Número 18.- Paralaje estereoscópico



La evaluación del paralaje de cada punto permite establecer la diferencia de alturas de dichos puntos. Esta propiedad constituye el gran logro de las fotografías aéreas de eje vertical y su utilización extensiva para levantamientos fotogramétricos. En un determinado momento se aísla un par estereoscópico. Suponiendo un detalle A del terreno, éste ha sido captado en las dos fotografías que configuran el par.

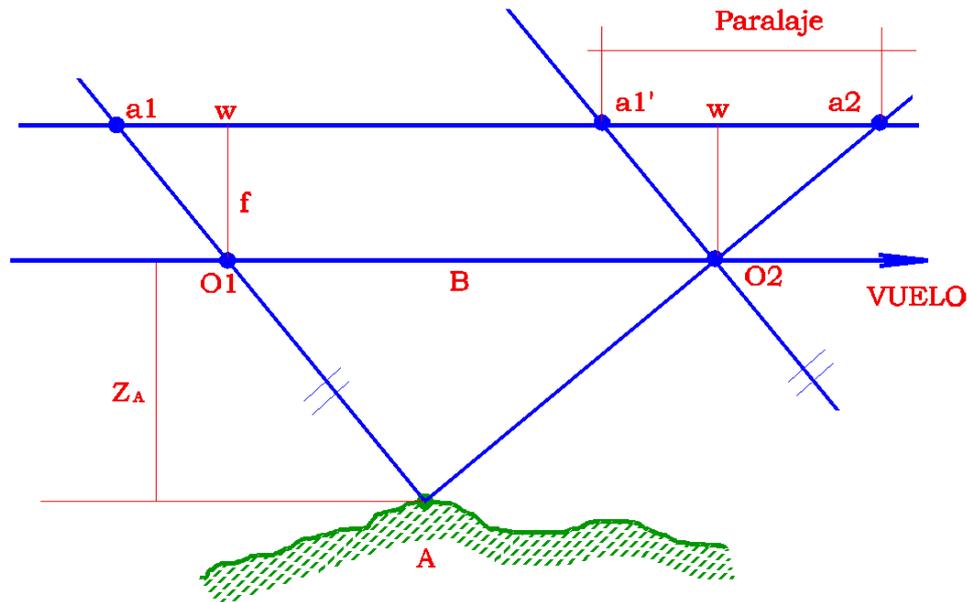


Figura Número 19.- Paralaje de un punto determinado

Los triángulos AO_1O_2 y $O_2a_1'a_2$ son semejantes.

$$\frac{Z_A}{f} = \frac{B}{P_A} \quad , \quad Z_A = \frac{B \cdot f}{P_A}$$

siendo:

Z_A = distancia vertical entre un punto genérico del terreno y la línea de vuelo

B = distancia recorrida por el avión entre dos disparos consecutivos

f = distancia focal de la cámara

P_A = paralaje del punto A

Evaluando el paralaje de dos puntos determinados en el terreno se puede obtener el desnivel existente entre ellos.

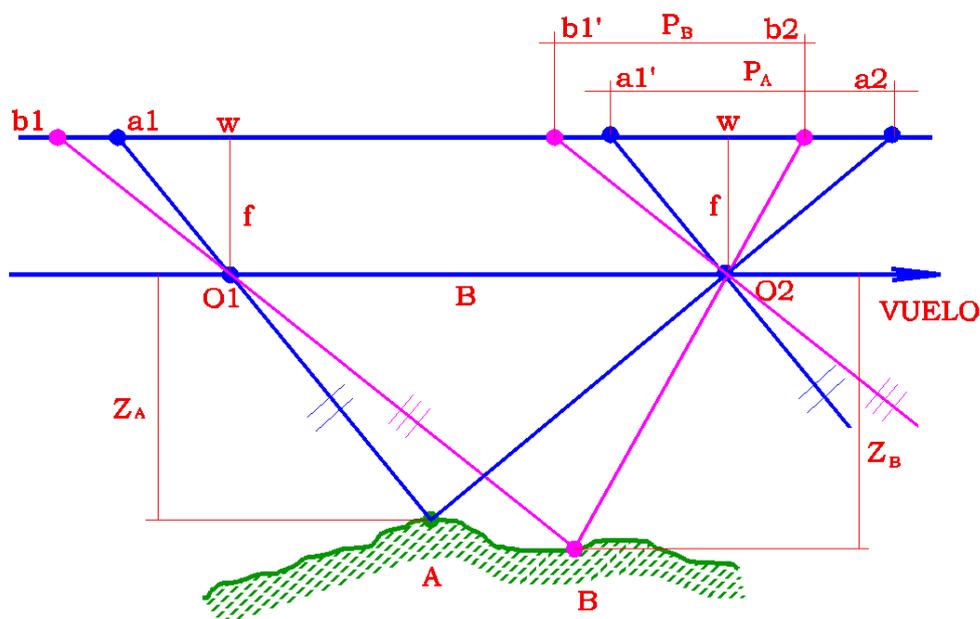
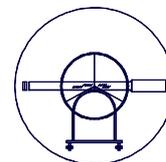


Figura Número 20.- Evaluación del desnivel existente entre dos puntos

En dos puntos cualquiera del terreno se verifica:

$$Z_A = \frac{B \cdot f}{P_A} \qquad Z_B = \frac{B \cdot f}{P_B}$$

$$Z_A - Z_B = B \cdot f \cdot \left[\frac{1}{P_A} - \frac{1}{P_B} \right]$$

siendo:

- P_A y P_B = paralaje de los puntos A y B
- B = base fotogramétrica
- f = distancia focal de la cámara
- Z_A y Z_B = distancia vertical entre el avión y el punto considerado

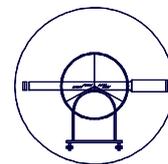
La medición del paralaje se realiza con una barra de paralaje o con un estereocomparador. Con estos últimos se logran excelentes precisiones, llegando incluso a evaluar valores del paralaje con 0,01 mm. de precisión.

1.5. LA FOTOINTERPRETACIÓN

1.5.1. ASPECTOS SIGNIFICATIVOS

La lectura de una fotografía aérea tan solo requiere sentido común y estar familiarizado con el producto final ofertado. Aspectos que es necesario considerar son los siguientes:

- Tono: En las fotografías pancromáticas en blanco y negro, un dato de sumo interés es el tono de los grises, asociados a los distintos colores.



- Forma: Los contornos del objeto denotan su procedencia natural o artificial.
- Sombras: Los objetos de forma vertical tienen sombras muy caracterizadas que colaboran en la identificación del objeto.
- Fecha: El día y la hora del vuelo. El primer dato permite conocer la estación del año, y el segundo, permite orientar la fotografía y entender conductas en torno a la actividad de la población.

1.5.2. INTERPRETACIÓN DEL RELIEVE

Los estudios de fotointerpretación deben apoyarse en un completo análisis estereoscópico de los pares. La visión con el estereoscopio de espejos permite examinar el relieve de una forma completa y eficaz.

Si el análisis del relieve hay que realizarlo con un fotograma aislado se puede tener información del relieve estudiando la hidrografía, vegetación. El estudio de las vías de comunicación es útil, ya que usualmente la planta informa de las dificultades orográficas.

Los aspectos particulares que es necesario analizar son los siguientes:

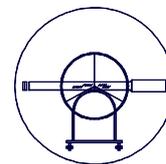
- Configuración del relieve: Escarpados, desmontes, terraplenes, hoyas, arenas, etc.
- Hidrografía: Costas y mares, ríos, lagos, embalses, albercas, canales, etc.
- Vegetación y cultivos: Monte, terrenos despejados, viñedo, olivar, cultivos arbóreos y arbustivos.

1.5.3. ELEMENTOS DE GEOGRAFÍA HUMANA

La actuación del hombre en el entorno queda patentizada con claridad en la foto aérea debido a las formas geométricas regulares.

Las modificaciones del entorno pueden clasificarse atendiendo a las características de la construcción en dos grupos:

- Construcciones lineales:
 - Vías de comunicación
 - Canales
 - Líneas aéreas de conducción eléctrica
 - Líneas aéreas telefónicas o telegráficas
 - Teleféricos
- Construcciones zonales:
 - Núcleos urbanos
 - Polígonos industriales
 - Terminales de transporte



Recintos mineros

Embalses

Obras de fábrica

1.6. LA ORTOFOTOGRAFÍA

Una ortofotografía es una fotografía en proyección ortogonal en la que por tratamiento en cada uno de los puntos-imagen se ha logrado una escala uniforme en toda su superficie. En este documento pueden hacerse las mismas medidas que las practicadas en un plano o mapa.

Por lo tanto, la ortografía consigue, tan solo, dotar de propiedades métricas a las fotografías. No obstante, pueden enumerarse tres claras ventajas de este tipo de documentos:

- Utilización como documento intermedio para la puesta al día de un mapa topográfico.
- Alternativa al mapa convencional en territorios que carecen de cartografía.
- Levantamientos catastrales.

1.7. APLICACIONES DE LA FOTOGRAMETRÍA

1.7.1. APLICACIONES TOPOGRÁFICAS

La fotogrametría topográfica tiene ventajas sobre los métodos topográficos clásicos:

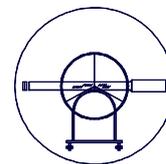
- Los trabajos de campo, cada vez más caros, son sustituidos en gran parte por los de gabinete.
- Mayor precisión y homogeneidad. Posibilidad de trazado de líneas continuas plani-altimétricas sin interpolación.
- Posibilidad de levantamiento de terrenos difíciles o inaccesibles (montañas, desiertos, ...).
- Si la superficie es grande, menor coste y mayor rendimiento.

Actualmente, la fotogrametría es el método clásico de levantamiento topográfico, pero esta fotogrametría topográfica puede ser:

- Terrestre: Haces con punto de vista en el terreno.
- Aérea: Haces con punto de vista en el aire.

El comienzo de la fotogrametría es terrestre. Pero la fotogrametría de este tipo no es capaz de dar una representación del terreno completa, fiel y precisa, es decir, sus inconvenientes más característicos son:

- Representación incompleta: No existe, por lo general, un punto de vista desde el que se puede fotografiar todo. Siempre existirán zonas muertas que no figuran en la fotografía.



- Levantamiento no homogéneo: La precisión de las intersecciones es función de la distancia y las distancias son muy variables.

Pero este tipo de fotogrametría sigue siendo muy valioso para levantamientos topográficos de pequeña extensión (presas, explotaciones a cielo abierto, ...) en los que el empleo del avión sería muy caro. En cambio, la fotogrametría aérea topográfica tiene grandes ventajas:

- Todo el terreno (excepto casos raros: cornisas de montañas, bosques muy cerrados) se ve sin ángulos muertos.
- Como todo el terreno está aproximadamente a la misma distancia de las tomas, las precisiones serán muy semejantes en todo el levantamiento.
- Es el único procedimiento viable para levantamientos extensos.

Su empleo es sistemático en todo el mundo, pero su aplicación es mucho más compleja que en fotogrametría terrestre ya que:

- No puede estacionarse en los puntos de vista cuya posición es desconocida.
- No pueden elegirse más que aproximadamente los elementos externos más favorables.

Por todo lo anteriormente enumerado, puede afirmarse que en fotogrametría aérea:

- Los elementos externos han de determinarse de modo indirecto. Por ello hacen falta los llamados puntos de apoyo que componen el canevas de restitución determinados por trabajos clásicos. Esto es una de las grandes servidumbres de la fotogrametría, aunque afortunadamente la fotogrametría es capaz de darse a sí misma este canevas (parcialmente).
- La restitución exige métodos más complejos que en fotogrametría terrestre, que han tardado mucho tiempo en ser puestos a punto.

1.7.2. APLICACIONES EN INGENIERÍA CIVIL

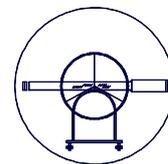
En el marco general de la Ingeniería existen cinco grandes grupos de actuaciones donde se utilizan las fotografías aéreas, desde el punto de vista de la fotointerpretación, ya sea con fotogramas aislados o por medio de pares estereoscópicos, con el recurso de un estereoscopio de espejos.

A) Establecimiento de vías de comunicación

Para analizar pasillos de posible establecimiento de trazados y detectar singularidades y áreas de conflicto, así como para estudiar interrelaciones con otras infraestructuras existentes.

B) Planificación territorial

En el planeamiento urbanístico y en la ordenación del territorio contribuyen a crear la base de información. Las fotos informan de una forma real sobre el territorio y sobre la población que lo habita.



El soporte de la información geográfica está conexasionado por la utilidad como herramienta de trabajo.

C) Análisis de reconocimiento geológico

Los estudios geológicos y los geotécnicos se apoyan en muchas ocasiones en análisis de fotos aéreas, evitando visitas innecesarias al campo. Zonas de diversas estructuras geológicas, análisis de laderas inestables, etc., pueden detectarse con el empleo de fotografías.

D) Hidrografía

Las huellas del paso del agua son fácilmente detectables en las fotografías. Son detectables todos los accidentes asociados al fenómeno. También se identifican con suficiente claridad las cuencas vertientes y las bandas de drenaje para el establecimiento de superficies significativas.

E) Estudios para confeccionar mapas temáticos

Las fotos ayudan a confeccionar cartografía temática destacando los análisis de usos del suelo, entre los que predominan los diversos cultivos. Cada tipo de vegetación proporciona una respuesta particular que puede ser diferenciada.

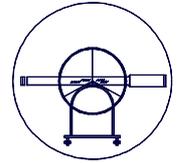
1.7.3. APLICACIONES NO TOPOGRÁFICAS

Las aplicaciones más usuales son aquellas orientadas a determinar la forma y las dimensiones de objetos fijos:

- Arquitectura y arqueología.
- Criminología: Establecimiento del estado de cosas muy rápido.
- Medicina: Cirugía, restitución de radiografías, localización precisa de tumores, cuerpos extraños, etc.
- Industria: Restitución de objetos industriales, de maquetas reducidas de objetos.
- Microfotogrametría: Superficies metálicas. Alas de insectos. Cromosomas.
- Escultura: Restitución de elementos artísticos.

También tienen aplicación para obtener determinaciones de objetos en movimiento o en transformación rápida. Las dificultades provienen de asegurar la simultaneidad de las tomas:

- Dinámica de fluidos: Corrientes, canales, olas.
- Aeronomía y meteorología: Nubes, corrientes ionosféricas.
- Resistencia de materiales: deformaciones debidas a cargas.
- Balística: Movimiento de proyectiles.
- Geodesia: Determinación de posiciones de puntos terrestres por fotos de satélites sobre fondo de estrellas.

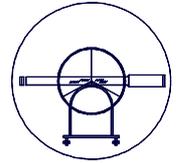


De igual forma, tienen aplicación para obtener determinaciones de objetivos en movimiento o en transformaciones lentas, tomando fotografías a intervalos más o menos largos:

- Glaciares.
- Deformaciones de presas, construcciones, obras de arte.

En todos los casos, el método es el mismo:

- Toma de vistas (al menos dos) con cámara especial. (Se conocen los elementos internos).
- Determinación de los elementos externos de cada haz.
- Identificación de los rayos homólogos.
- Búsqueda de las intersecciones de estos rayos.



2. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES Y EL MÉTODO GENERAL DE LA FOTOGRAMETRÍA

2.1. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LA FOTOGRAMETRÍA

2.1.1. HAZ PERSPECTIVO

Definida una superficie (S) y un punto V, fuera o dentro de (S), se denomina haz perspectivo (H), relativo a V y a (S) al conjunto finito o infinito de rectas VX.

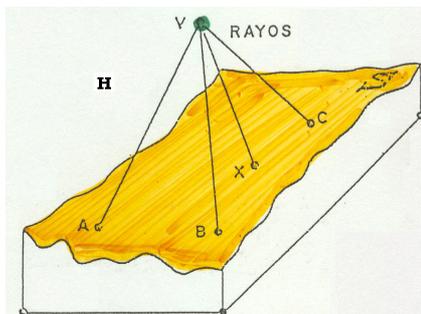


Figura Número 21.- Haz perspectivo simple y elementos fundamentales

A V, vértice del haz, se le denomina “punto de vista” y cualquier elemento VX recibe el nombre de rayo perspectivo.

El conocimiento del punto de vista y del haz perspectivo no permite determinar la superficie (S). Un haz no determina un objeto, ya que los puntos A, B, C, ..., X no pueden fijarse en las semirrectas.

Definida una superficie (S) y dos puntos de vista diferentes, V_1 y V_2 , a cada punto de la superficie le corresponden dos rayos, uno de cada haz, que son únicos V_1A y V_2A . Estos rayos se denominan rayos homólogos.

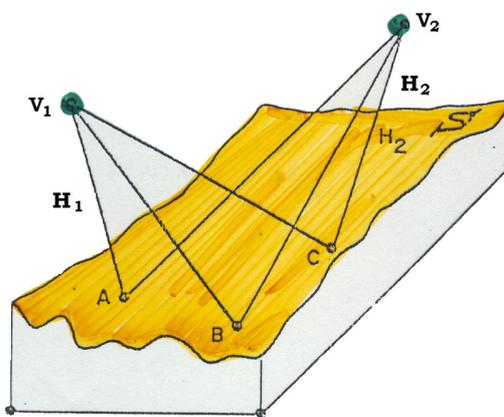
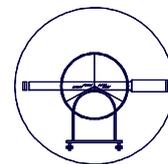


Figura Número 22.- Haces perspectivos con puntos de vista diferentes

Disponiendo de los haces perspectivos (H_1) y (H_2) se podría conocer (S) como conjunto de las intersecciones de los rayos homólogos. Para ello es necesario:

- Conocer la forma o posición relativa de los diferentes rayos que lo componen. Se podría, por ejemplo, saber el valor de los ángulos que forman entre sí los rayos, o bien, los datos que determinan esos ángulos. El conjunto de datos que determinan la forma del haz se denomina datos internos.



- Tener información de la posición en el espacio de cada haz respecto a un sistema de referencia previamente adoptado. El conjunto de datos que determinan tal posición se denomina Datos externos.
- Conseguir la total identificación de los rayos homólogos, asociándolos sin ambigüedad.

Si se consigue la resolución general de la problemática planteada se dice que se ha seguido el método general de la fotogrametría y así, la determinación de una superficie (S) como conjunto de intersecciones de rayos homólogos se ha reducido a un problema de geometría, que puede ser resuelto por cálculo numérico, por construcciones gráficas o por métodos mecánicos. La operación de búsqueda de las intersecciones de rayos homólogos es la restitución en general.

Esta metodología es semejante a muchos procedimientos topográficos. La originalidad de la fotogrametría está en la manera de definir los haces a partir de fotografías.

2.1.2. DEFINICIÓN DE UN HAZ PERSPECTIVO POR SUS DATOS INTERNOS

Existen varios métodos para definir un haz perspectivo:

A.- Medida directa

Podría conseguirse estacionando un teodolito en el punto de vista y desde él, visar los puntos que definen el objeto, anotando los ángulos horizontales y verticales que configuran el registro individualizado de los haces.

B.- Uso de una perspectiva

Definido un haz perspectivo, si se intercepta por un plano cualquiera (π) se obtiene una perspectiva o imagen perspectiva del objeto.

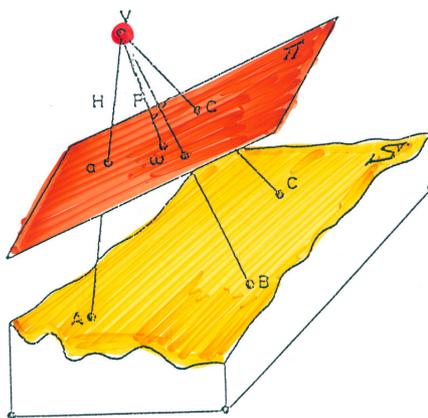
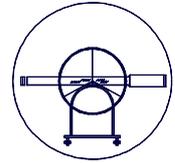


Figura Número 23.- Perspectiva o imagen perspectiva

Se denomina:

- Plano del cuadro: es el plano secante (π) al haz perspectivo (H).
- Eje principal: es la normal al plano del cuadro, trazada desde el vértice del haz.



- Punto principal: es la intersección, w , del eje principal y el plano secante (π).
- Distancia principal: es la distancia existente, f , entre el vértice del haz y el punto principal.

Para determinar el haz es insuficiente el conocimiento de la perspectiva. Es preciso conocer f y w , denominándose a estos elementos “parámetros internos del haz”. Su conocimiento permite situar el punto de vista respecto del plano del cuadro, y las semirrectas Va , Vb , Vc , ..., definen el haz.

Una perspectiva dibujada no da mucha precisión, ni gran rendimiento, pero el método constituye el origen de la fotogrametría.

C.- Uso de una fotografía

Una fotografía no define una perspectiva geométrica ideal de un determinado objeto. Al estudiar el proceso fotográfico se deduce:

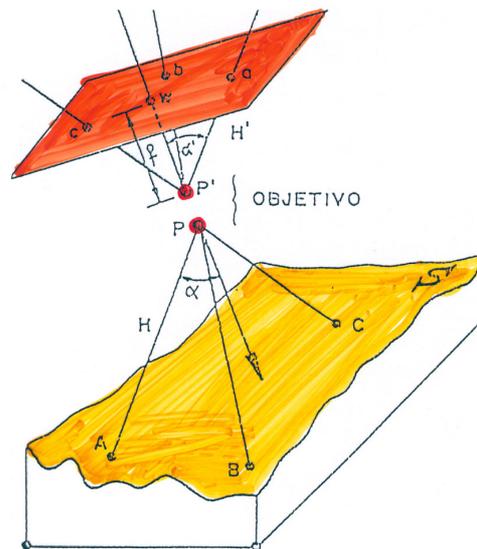


Figura Número 24.- Elementos esenciales del proceso fotográfico

El objetivo fotográfico transforma el haz (H) en el haz (H'). Se denomina:

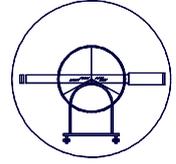
- Haz perspectivo de (S) y pupila de entrada: (H) y V.
- Haz perspectivo de (S) y pupila de salida: (H') y V'.

A todo rayo VX le corresponde otro $V'x$ pero, en general, el ángulo AVB difiere del ángulo $aV'b$ debido a las denominadas “distorsiones” de la lente. El haz (H') podrá ser reconstruido si se conocen sus elementos internos f y w . Conocido (H') podrá reconstruirse (H) si se conoce la función de distorsión:

$$\alpha = f(\alpha')$$

que proporciona el ángulo de entrada conocido el de salida.

Se denominan parámetros internos de la fotografía:



- La distancia principal f .
- La posición del punto principal w .
- La función de distorsión $\alpha = f(\alpha')$

La determinación de un haz mediante una fotografía tiene unas características peculiares:

- El registro es inmediato, instantáneo y total.
- El haz puede reconstruirse sin omitir ningún rayo.
- La precisión es mucho menor que usando un teodolito.

La menor precisión es suficiente para muchas aplicaciones, siempre que haya un buen conocimiento de los datos internos. Es necesario utilizar:

- Materiales fotográficos muy particulares.
- Cámaras fotográficas muy especiales.
- Métodos de medida muy originales.

El primer problema de la fotogrametría es la precisa determinación de los datos internos.

2.1.3. DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN EN EL ESPACIO DE UN HAZ

Es preciso adoptar un cierto sistema, en principio arbitrario, de referencia. Los datos o parámetros externos del haz se refieren a ese sistema y variarán si se acepta o no.

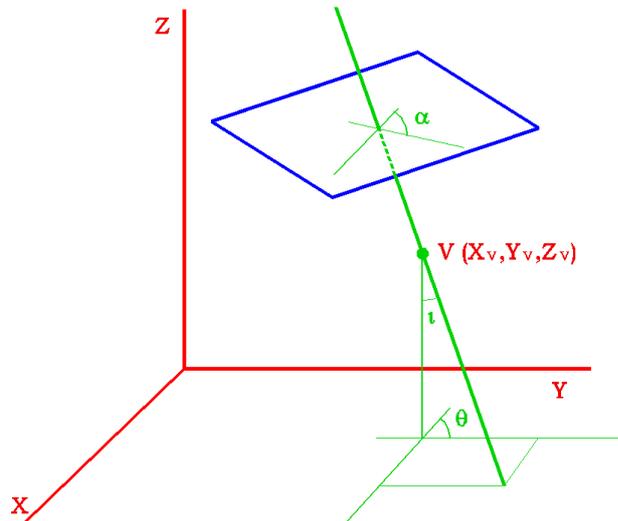
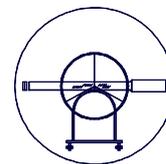


Figura Número 25.- Referenciación de los parámetros externos del haz

Los datos pueden ser:

- Coordenadas del vértice del haz (X_v, Y_v, Z_v), pupila de entrada del objetivo.



- Los tres ángulos: θ (acimut de $N\Omega$), i (inclinación del eje principal) y α (ángulo entre una dirección fija en la imagen ($\omega\eta$) con la sección del plano imagen con el vertical ($VN\Omega$)).

Pueden existir otros datos externos, pero siempre, como en toda determinación de la posición de un sólido en el espacio, se necesitan seis datos independientes. En efecto:

- Las coordenadas (X_v, Y_v, Z_v) sitúan a V y, por tanto, a V' .
- El ángulo θ sitúa a $N\Omega$.
- El ángulo i sitúa a $V\Omega$ y, por lo tanto, w mediante f .
- Se traza un plano perpendicular w al eje principal.
- Se dibuja la sección wm .
- Con el ángulo α se sitúa h , que sitúa el plano imagen, por lo tanto, está situado el haz (H').
- Conociendo la función de distorsión se determina (H).

Estos parámetros pueden ser determinados:

- a) Directamente: Fotogrametría terrestre. Se puede estacionar en el punto de vista.
- b) Indirectamente: Fotogrametría aérea. El punto de vista es móvil.

El segundo problema de la fotogrametría es la determinación de los parámetros externos. Su determinación es muy diferente en el caso de fotogrametría terrestre y en el de fotogrametría aérea.

2.1.4. IDENTIFICACIÓN DE RAYOS HOMÓLOGOS

La identificación de rayos homólogos depende de la forma en que haya sido definido el haz perspectivo.

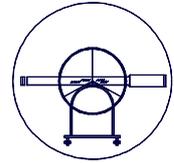
A.- Medida directa

La operación se realiza utilizando un teodolito e identificando claramente cada punto visado desde cada estación. Necesariamente, la operación ha de restringirse a un número limitado de puntos del objeto, por una parte para que la operación tenga fin y, por otra, por las dificultades debidas al hecho de que el objeto cambia de faz visto desde una y otra estación. Sólo se toman los puntos seguros. Sería precisa una tercera visual para asegurar la operación.

B.- Perspectiva dibujada

Existe la misma dificultad que en la medida directa. Los puntos de vista deben estar próximos para que las perspectivas se asemejen, debido a ello, la intersección no resulta perfecta.

En cualquier caso, ambos modos darán lugar a la restitución de un número de puntos finitos del objeto. Por ello, las líneas continuas del objeto tendrán que reproducirse por interpolación entre los puntos restituidos.



También haría falta una tercera perspectiva para asegurar la operación.

C.- Fotografía

Existen las mismas dificultades que las enunciadas, pero pueden ser resueltas con la observación estereoscópica de pares de fotografías.

Si se hacen dos fotografías del objeto desde dos puntos de vista diferentes y se examinan fotos en ciertas condiciones que se estudiarán con detalle posteriormente, la observación se realiza con una sensibilidad tan grande que es éste uno de los hechos básicos que han construido la fotogrametría. Serán homólogos los rayos que van a puntos fusionados estereoscópicamente. No hace falta la tercera foto y la influencia de la pequeña base no es tan importante como en los casos anteriores.

La fusión estereoscópica de ambas imágenes permite identificar rayos homólogos que corresponden a imágenes no materializadas por ningún detalle, haciendo posible la restitución por líneas continuas, sin necesidad de interpolación. Esto representa una ventaja esencial sobre todos los demás métodos de representación de superficies. Se obtiene una homogeneidad y fidelidad en la reconstrucción de formas, muy difícil de obtener de otro modo.

2.1.5. RESTITUCIÓN

Se denomina restitución a la búsqueda de la intersección de los rayos homólogos de los dos haces. De esta forma se determinan las coordenadas de los puntos del objeto en el sistema de referencia adoptado.

En los métodos clásicos (observación con teodolito), la restitución topográfica sólo alcanza a un número finito de puntos. El resto se obtiene por interpolación.

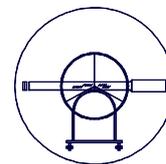
Siempre que se busca una representación mediante “líneas continuas” de un objeto, es muy interesante la automatización del proceso, único medio de aprovechar la ventaja del método de la fotogrametría.

Debe diseñarse un aparato que, siempre que un operador efectúe una puntería estereoscópica, es decir, determine la identificación de dos rayos homólogos, proporcione el punto restituido mediante la intersección, a través de una representación gráfica o numérica.

El aparato capaz de efectuar esta analogía mecánica se llama instrumento de restitución, restituidor o autógrafo.

Un restituidor debe tener:

- Un sistema de reconstrucción, mediante sus elementos internos, de cada haz.
- Otro para situar en el espacio cada uno mediante sus elementos externos.
- Un sistema de observación estereoscópica de ambas fotografías.
- Uno de restitución que materialice los pares de rayos homólogos y su intersección.



- Un sistema de obtención gráfica de las posiciones de las intersecciones.

Esta es la llamada solución analógica. Pero también existe la solución analítica: la analogía mecánica se sustituye por el cálculo automático de las coordenadas de las intersecciones obtenidas por puntería estereoscópica. Incluso parece posible sustituir el operador humano por un correlador de imágenes que sea capaz de identificar automáticamente los rayos homólogos.

2.2. MÉTODO GENERAL DE LA FOTOGRAMETRÍA

2.2.1. INTRODUCCIÓN

Sean A y B dos posiciones sucesivas del avión desde los que se han tomado fotografías. Los rayos de luz han impresionado las placas, formando dos haces perspectivas.

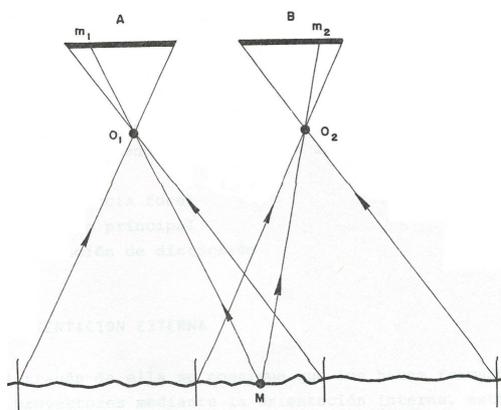


Figura Número 26.- Haces perspectivas y posición puntual

Colocando las fotografías en la misma posición relativa respecto a la que tenían cuando fueron impresionadas, y si se iluminan con sendos proyectores, se volverían a formar los mismos haces iniciales. Los rayos homólogos se cortarían, dando sus intersecciones una reproducción exacta del terreno. Ocurrirá que como esta operación se hace en gabinete, la distancia A-B (O_1-O_2) será más pequeña y el modelo estará a una cierta escala.

El problema a resolver consistirá en conseguir en gabinete la reproducción exacta de los dos haces de rayos y que su situación respecto al terreno sea análoga a la que tuvieron al ser impresionadas ambas fotografías durante el vuelo. La operación a través de la cual se consigue todo ello es la orientación.

2.2.2. ORIENTACIÓN INTERNA Y EXTERNA

2.2.2.1. Orientación interna

A través de ella se reproduce en cada proyector un haz de rayos idénticos al que se impresionó en cada fotografía. Se consigue conociendo los elementos internos:

- Distancia focal.
- Punto principal.
- Función de distorsión.

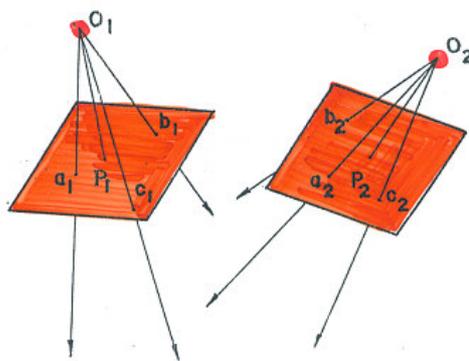
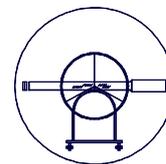


Figura Número 27.- Orientación interna

2.2.2.2. Orientación externa

A través de ella se consigue que los haces formados en los dos proyectores mediante la orientación interna estén con respecto al terreno en idéntica posición a la que tuvieron al ser impresionadas las fotografías, consta de dos fases, la orientación relativa y la absoluta.

La orientación relativa tiene por objeto colocar los dos haces proyectivos en posición perspectiva. Según la geometría proyectiva, bastará que se efectúe la intersección simultánea de cinco pares de rayos homólogos para que todos los otros intersecten también.

La orientación absoluta tiene por objeto ajustar el modelo al sistema de coordenadas del terreno fotografiado. Para ello inicialmente se da escala al modelo y posteriormente se lleva el modelo a una posición adecuada del eje z.

A.- Orientación relativa

Colocando las dos fotografías obtenidas con un recubrimiento de un 60% aproximadamente, sobre sendos proyectores, los rayos homólogos no se cortarían sobre la mesa o pantalla.

Determina una separación denominada paralaje (P), susceptible de ser descompuesta en dos componentes:

P_x : paralaje longitudinal u horizontal

P_y : paralaje vertical o transversal

El paralaje horizontal se puede anular subiendo o bajando la pantalla, o bien acercando o separando los proyectores.

El problema de la orientación relativa consiste en eliminar el paralaje transversal P, es decir, la orientación relativa se habrá conseguido cuando no se encuentre paralaje transversal en ninguna de las intersecciones de rayos homólogos.

Los posibles movimientos de un proyector y los efectos que producen o, mejor, el paralaje que crean cada uno de estos movimientos en los diferentes puntos de un cliché, es la primera cuestión a tratar.

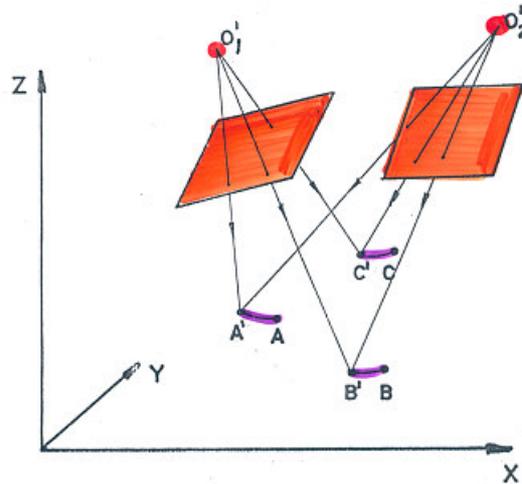
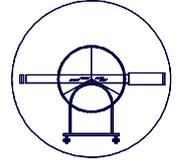


Figura Número 28.- Orientación relativa

También se pueden calcular geoméricamente las fórmulas correspondientes al paralaje obteniendo expresiones finales que son necesarias tratar mediante programas de ordenador.

Aplicando métodos analíticos no hace falta ni formar el modelo. Se miden las coordenadas imagen con un comparador y se calculan las ecuaciones de los rayos y así, aplicando condiciones de coplaneidad entre base y rayos homólogos, se pueden determinar matemáticamente los parámetros de la orientación relativa.

B.- Orientación absoluta

Finalizada la orientación relativa al modelo ya está formado, y para acabar de ajustar el par estereoscópico, quedan aún dos operaciones:

- Colocar el modelo a la escala adecuada.

Hasta ahora se ha considerado la escala fotográfica:

$$\frac{1}{E_F} = \frac{f}{H - h}$$

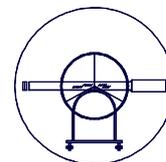
y la escala de la minuta que se quería formar E_M , pero hay una tercera escala, que es la escala del modelo (sistema analógico), que tiene un valor comprendido entre los dos anteriores y su valor será:

$$\frac{1}{E_{Md}} = \frac{l}{L}$$

siendo l la distancia medida entre dos puntos del modelo y L su verdadero valor en el terreno. En función del aparato de restitución suele haber una escala óptima E_{Md} , en función de las E_F y E_M .

- Nivelar el modelo.

Con la operación anterior se ha puesto el modelo a escala, pero puede estar en cualquier posición en el espacio, por lo que es preciso nivelarlo, es decir,



que su eje vertical coincida con la vertical del terreno. Para ello es necesario conocer la altitud en el terreno de tres puntos como mínimo.

Del campo se obtiene la cota de tres puntos, perfectamente identificables en las fotografías y con una posición relativa A, B, C. Ajustando convenientemente se logra nivelar completamente el modelo en la opción analógica.

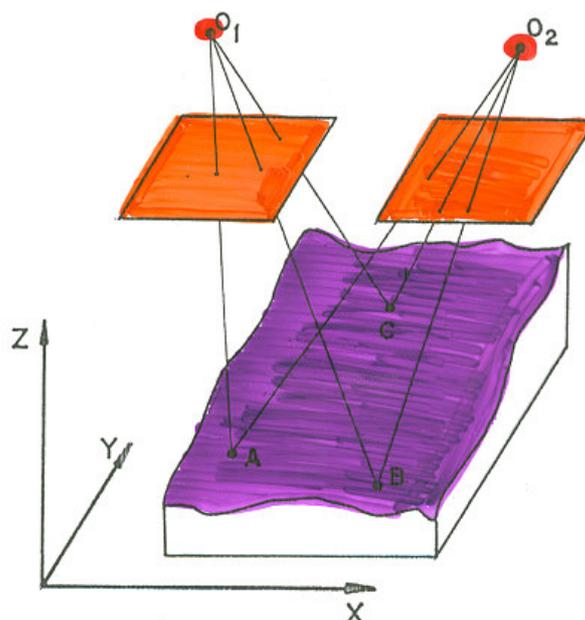


Figura Número 29.- Orientación absoluta

De igual forma se calcula el Δz en el punto D. De esta forma se obtienen los ángulos que hay que introducir en los proyectores. En resumen, para el ajuste de escala hacia falta conocer dos puntos como mínimo ($X_1 Y_1 Z_1$), ($X_2 Y_2 Z_2$) y para el nivelado del modelo hace falta una altitud más, Z_3 , pero con ello no se tiene ninguna comprobación, por lo que se suelen tomar para cada par estereoscópico cuatro puntos. Estos son los llamados puntos de apoyo y es la gran dependencia que tiene la fotogrametría de la topografía clásica. Al ser una fase de trabajo que hay que realizar en el campo, encarecía bastante el trabajo final, de ahí que, desde el inicio de la fotogrametría, se ha tratado de aminorar esta dependencia por los métodos de aerotriangulación, consistente en formar parte del canevas de restitución a través de métodos fotogramétricos.

En la actualidad, apoyar vuelos fotogramétricos por Geodesia Espacial es sencillo y económico, y utilizar técnicas complementarias de aerotriangulación sigue siendo útil y conveniente. A continuación se incluyen ejemplos de la posición que ocupan los puntos de apoyo en pares aislados y en esquemas de vuelo.

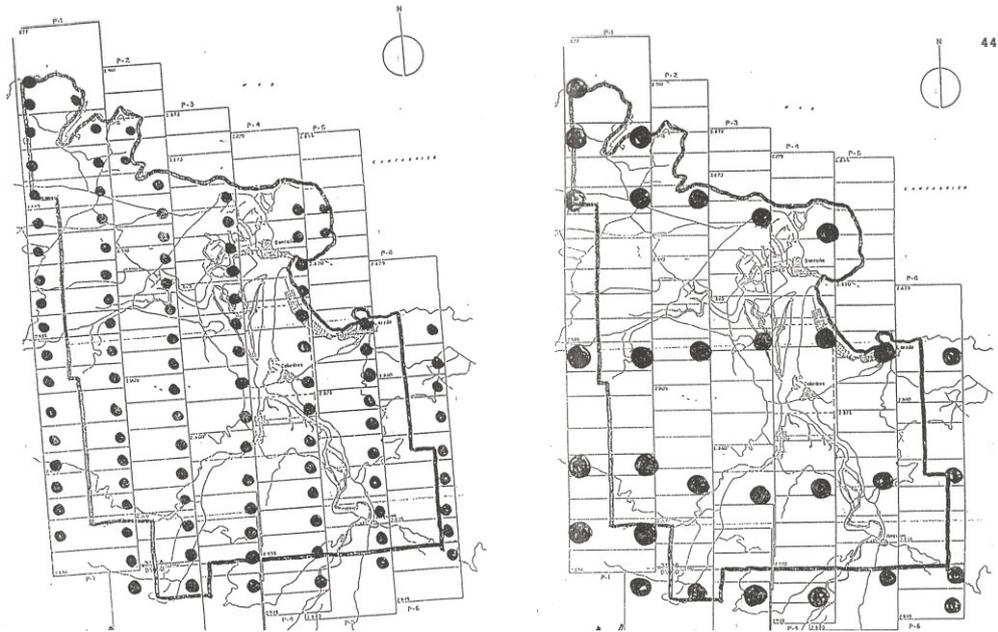
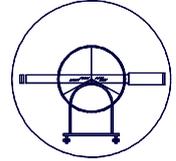
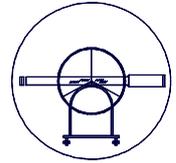
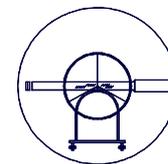


Figura Número 30.- Posición relativa de los puntos de apoyo



3. RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA



3.1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE GEORREFERENCIACIÓN

El plano o mapa constituye el soporte de información y comunicación más usual, a pesar de su abstracción y subjetividad, por tener una interpretación o lectura más fácil y estructura que cualquier otra forma de comunicación científica. Su aplicación se ha generalizado en el estudio de las ciencias en sentido global y, sobre todo, en las que de una manera directa inciden sobre el territorio: obras públicas, transportes, comunicaciones, tipos de suelos, ordenación, medio ambiente, excavaciones arqueológicas. De ahí, la gran producción cartográfica de los últimos años, tanto de cartografía topográfica como temática, por parte de las diversas administraciones, entidades, empresas y profesionales.

Se puede asegurar que el mapa o, mejor, la información cartográfica, constituye la herramienta fundamental para el análisis, toma de decisiones y seguimiento de todas las actividades relacionadas de una u otra manera extraordinaria. Entendiendo el mapa como medio de comunicación, el proceso cartográfico ha de cuidarse para conseguir una transmisión eficaz y precisa de la información. Lo primero es captar la información geográfica de forma adecuada para, con posterioridad, realizar el tratamiento correcto. En los últimos años, tanto la forma de captar la información como la manera de realizar el posterior proceso cartográfico, han evolucionado de una forma extraordinaria.

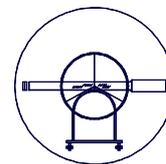
La captación de información en la etapa previa a la utilización de nuevas metodologías y nuevos instrumentos era una auténtica odisea. Hace relativamente pocos años, la captación de información era siempre puntual e “in situ”. La confección de cartografía por métodos clásicos obligaba al cartógrafo a hacer la selección antes de la toma de información, de tal manera que se representaba un territorio como un conjunto de puntos cuyos parámetros espaciales había que determinar uno a uno. Es necesario pensar en esos planos levantados con planchetas, brújulas y otros goniómetros estadimétricos.

Con la puesta a punto de los equipos electrónicos (estaciones topográficas y niveles digitales) y la completa incorporación del Sistema de Posicionamiento Global a los trabajos geodésicos, se ha dado un impulso definitivo a una nueva forma de captar y tratar la información.

Tomando un colección de punto (x,y,z, atributo) con GPS (estaciones enganchadas en la Red Geodésica) y con una estación topográfica (los puntos radiados desde ellas), es posible configurar una nube de puntos susceptible de formar un modelo digital del terreno (MDT), que es una representación analítica de las características del terreno mediante el sistema coordenadas/atributos, almacenadas en un soporte para que en su posterior procesado permita una explotación útil, completa y fiable, consiguiendo la automatización del procedimiento de captura de información.

Las ventajas más inmediatas al automatizar el proceso cartográfico son:

- La información se registra en un soporte totalmente estable, pudiendo realizar copias de seguridad de manera fácil, rápida y económica.



- El almacenamiento es fácil y poco voluminoso, y mantiene la precisión geométrica, pues los soportes analógicos, aún siendo indeformables, sufren con el tiempo desajustes dimensionales.
- La puesta al día de la información es fácil y rápida, y es susceptible de tratamientos geométricos propios del soporte digital.
- Posibilidad de cambio de sistema de referencia y de escala, y posibilidad de seleccionar al parte de información que sea necesaria.
- Posibilidad de integrar la información cartográfica con bases de datos monográficos y acelerar el proceso de producción de mapas, acortando el tiempo entre la toma de datos y la edición.
- Eliminar las partes más tediosas de la producción cartográfica como es el dibujo, cortado de máscaras, rotulación, simbología, etc., que requieren en general personal muy especializado, reduciendo los costes cuando la cadena de producción es operativa.

Después de todo lo expuesto, las técnicas de análisis y representación de datos espaciales en el ámbito regional pasan por un tratamiento informático para hacer posible que el volumen y variedad de datos de tipo físico, social y económico puedan almacenarse, tratarse y recuperarse, dando todo ello lugar a los Sistemas de Información, que se pueden definir como los archivos de datos constantemente actualizados, que al consultarlos se pueda obtener de manera idónea la información solicitada por el usuario. En función del tipo de datos almacenados, así se denominará al sistema. Será un Sistema de Información Geográfica cuando se nutra al sistema de información sobre datos que posean una localización geográfica.

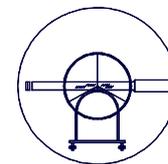
La puesta en soporte informático de toda la cartografía clásica derivada o temática, con una estructuración adecuada, constituye una Base Cartográfica Numérica (BCN) y la puesta en soporte informático de información no estrictamente cartográfica, pero referenciable espacialmente como datos descriptivos de algún resto, caracterización del soporte, etc., constituyen una Base de Datos Monográficos (BDM).

El Sistema de Información Geográfica (SIG) será la fusión de una BCN y una BDM, de tal manera que el SIG debe recoger datos sobre situación y características de elementos geográficos y organizarlos en las correspondientes Bases de Datos (BD) que deben estructurarse de forma que resuelvan rápidamente las demandas de información. La estructuración en BD de la información se ha de hacer tanto por temas como por escalas, siendo el nexo común la localización geográfica.

3.2. CONTRIBUCIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA A LA CAPTURA DE INFORMACIÓN GEORREFERENCIADA

El procedimiento fotogramétrico se caracteriza por la resolución de un problema espacial:

- Conocer la forma o posición relativa de los diferentes haces perspectivos que integran la información fotográfica. Se podría, por ejemplo, saber el valor de los ángulos que forman entre sí los rayos, o bien, los datos que



determinan esos ángulos. El conjunto de datos que determina la forma del haz se denomina datos internos.

- Tener la información de la posición en el espacio de cada haz respecto a un sistema de referencia previamente adoptado. El conjunto de datos que determina tal posición se denomina datos externos.
- Conseguir la total identificación de los rayos homólogos, asociándolos sin ambigüedad.

Si se consigue la resolución general de la problemática planteada, se dice que se ha seguido el método general de la fotogrametría y así la determinación de una superficie como conjunto de intersecciones de rayos homólogos se ha reducido a un problema de geometría, que puede ser resuelto por cálculo numérico, por construcciones gráficas o por métodos mecánicos. La operación de búsqueda de las intersecciones de rayos homólogos es la restitución en general.

Se denomina restitución a la búsqueda de la intersección de los rayos homólogos de los dos haces. De esta forma se determinan las coordenadas de los puntos del objeto en el sistema de referencia adoptado. Siempre que se busca una representación mediante líneas continuas de un objeto es muy interesante la automatización del proceso, único medio de aprovechar la ventaja del método de la fotogrametría. Debe diseñarse un aparato que, siempre que un operador efectúe una puntería estereoscópica, es decir, determine la identificación de dos rayos homólogos, proporcione el punto restituído mediante la intersección, a través de una representación gráfica o numérica. El aparato capaz de efectuar esta analogía mecánica se llama instrumento de restitución, restituidor o autógrafo.

Un restituidor debe tener:

- Un sistema de reconstrucción, mediante sus elementos internos, de cada haz y otro para situar en el espacio cada uno mediante sus elementos externos.
- Un sistema de observación estereoscópica de ambas fotografías, uno de restitución que materialice los pares de rayos homólogos y su intersección, y un sistema de obtención gráfica de las posiciones de las intersecciones.

Esta es la llamada solución “analógica”. Pero también existe la solución analítica: la analogía mecánica se sustituye por el cálculo automático de las coordenadas de las intersecciones obtenidas, por puntería estereoscópica. Incluso parece posible sustituir el operador humano por un correlador de imágenes que sea capaz de identificar automáticamente los rayos homólogos.

En cualquier caso, un autógrafo es una entidad muy completa de construcción muy complicada. Existen en el mundo muy pocas fábricas de instrumentos fotogramétricos. Las más importantes son europeas y los principales tipos de restitución son los siguientes:

3.2.1. RESTITUCIÓN ANALÓGICA

Al trabajar con restituidores analógicos se dispone, una vez formado el modelo, de dos tipos de salida de información.

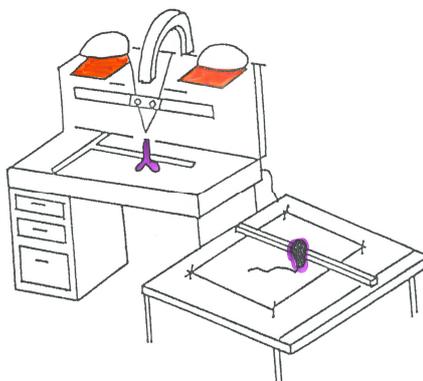


Figura Número 31.- Restituidor analógico

A través de engranajes mecánicos se pueden transmitir los movimientos del índice a la mesa de dibujo. Esta ha sido la forma tradicional de restituir en los equipos analógicos, debiendo seleccionarse los engranajes adecuados en función de las escalas de modelo fotogramétrico y de plano.

Con el avance de la técnica, los movimientos del índice son transformados por unos aparatos llamados codificadores en impulsos eléctricos que se transmiten a través de un cable. Dichos impulsos pueden ya ser recibidos por distintos periféricos, de uno en uno o bien varios a la vez. Así se tiene que si los impulsos van a una mesa de dibujo digital son decodificadores y el instrumental de dibujo puede ser desplazado a la posición que indican, obteniendo los mismos resultados de los engranajes mecánicos, sin el problema de los mismos.

3.2.2. RESTITUCIÓN NUMÉRICA

Si los impulsos van a parar a un ordenador se está en la llamada restitución numérica, en la que los datos podrán ser tratados por el ordenador de distintas formas en función de su propia capacidad física (hardware) y de los programas disponibles para el tratamiento (software). En cualquier caso, para cada modelo se dispone de un fichero en el que se grabarán las coordenadas, siendo fundamental que el ordenador tenga la suficiente potencia como para registrar los datos a cualquier escala y con cualquier operador, sin perder ningún punto por exceso de los mismos. Una vez generado el fichero, podrá ser ploteado por separado o unido a los demás ficheros componentes de la hoja a la escala deseada, siendo sustituida la mesa de dibujo por un ploter.

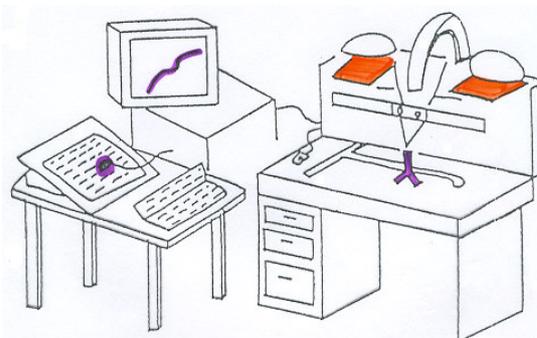
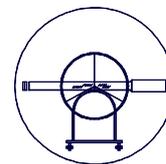


Figura Número 32.- Restituidor numérico



Existen dos tipos de restitución numérica: ciega e interactiva. En cualquier caso, en la restitución numérica la orientación relativa se ha de hacer de igual forma que en la restitución analógica convencional, con los giros y traslaciones disponibles en el restituidor. Para la orientación absoluta existen programas de ayuda en los que una vez que se ha posado en un par de puntos, ya el sistema puede disponer de unos valores aproximados del giro general y de la escala, y puede seguir en pantalla el movimiento sobre el modelo, realizando los cálculos necesarios y mostrando en pantalla los giros generales y la base a introducir en el restituidor.

3.2.3. RESTITUCIÓN ANALÍTICA

En los restituidores analíticos ya no se va a intentar reproducir el terreno con la formación óptima de un modelo o con la mecánica, describiéndolo con el extremo de las barras correspondiente a cada proyector como ocurría en los analógicos. En los analíticos se tiene una medida de coordenadas sobre los fotogramas que por cálculos matemáticos en un ordenador va a pasar a coordenadas terreno que son registradas en un fichero, con lo cual se dispone de datos en la misma forma que en la restitución numérica, existiendo también restituidores analíticos ciegos y otros interactivos, con una clara tendencia actual a estos últimos con la evolución de la técnica.

La diferencia entre la restitución numérica y la analítica procede de la entrada de datos y de la universalidad de la analítica frente a las limitaciones de la numérica procedentes del restituidor analógico que genera los datos.

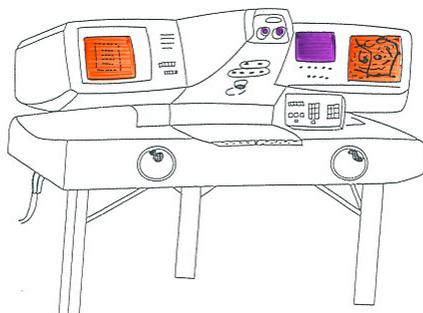


Figura Número 33.- Restituidor analítico

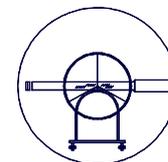
3.3. LA RESTITUCIÓN DIGITAL

3.3.1. TRATAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN

Las actuales disponibilidades técnicas han permitido que muchos métodos para el tratamiento de la información se puedan expresar con mayor facilidad, destacando los relacionados con el proceso digital de la imagen.

Al conseguir discretizar el píxel en base a 256 tonos diferentes de grises y cuantificar la imagen de esta forma, se logró el primer paso para conseguir el sistema color basado en cuatro colores fundamentales (carta de color): cyan-magenta-amarillo-negro.

Una fotografía aérea convencional (23 cm.x23 cm.) configura una imagen continua que puede ser transformada en imagen discreta, atendiendo al tamaño de píxel.



LADO DEL PIXEL		OCUPACIÓN INFORMÁTICA (Megabytes)
Milímetros	Micras	
0,4	400	0,33
0,2	200	1,3
0,04	40	33
0,025	25	84

Es necesario destacar que en la actualidad, la instrumentación para digitalizar imágenes ya alcanzó la división de las siete micras y que la anterior cuantificación corresponde a un canal (imagen en blanco y negro), siendo preciso multiplicar por tres en el caso de color.

3.3.2. LA RESTITUCIÓN DIGITAL

El restituidor digital es la nueva generación de instrumentos de restitución fotogramétrica que se fundamenta en la tecnología de imágenes aéreas pasterizadas y en los algoritmos funcionales de la fotogrametría analítica.

La configuración está constituida por un sencillo entorno software (PC, MicroStation, Windows, ...) y un hardware convencional (a partir de CPU: 486/766 Mhz con 64 Mb Ram), acompañados de un sistema de visión y otro de control globalizado.

Una primera aproximación a la precisión esperada se puede dar de la siguiente forma:

$$P = \frac{1}{2} \cdot R \cdot E_F$$

siendo:

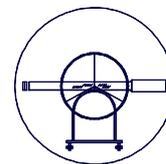
P: precisión altimétrica

R: resolución del escaneo

E_F: denominador de la escala (fotografía)

Aplicando esta relación a una foto aérea a escala 1/3.000, resulta:

TAMAÑO PÍXEL RESOLUCIÓN (Micras)	PRECISIÓN POSADO (Centímetros)	CATEGORÍA DEL RESTITUIDOR
100	15	2 ^a
40	6	2 ^a
20	3	1 ^a
7	1,05	1 ^a



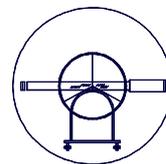
3.3.3. LA ORTOIMAGEN DIGITAL

La ortofotografía es un documento producto de la ya denominada fotografía convencional que permite aprovechar las propiedades informativas de las fotografías aéreas para realizar las mismas medidas que en un plano convencional.

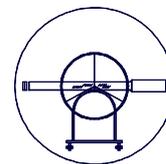
En la actualidad, en el marco de la restitución digital, se puede obtener como subproducto de la nueva restitución un documento similar al anterior de fotografía digital, con la utilización del proceso informático. Aprovechando los datos del apoyo fotogramétrico se realiza la rectificación de las imágenes: escala, pendiente y orientación, logrando el mosaico ortogonal donde se pueden superponer la altimetría, las líneas delimitadoras del espacio de la excavación y la toponimia. Y todo tratado desde las teclas de un PC por medio de programas convencionales, ampliamente difundidos.

La metodología es muy sencilla y técnicamente muy factible en la actualidad. Después de escanear la fotografía aérea (la diapositiva) y obtener la información en un formato Tiff o similar, con ayuda de los datos obtenidos en el apoyo fotogramétrico se logra escalar y nivelar el conjunto de píxeles, formando la georreferenciación tras un sencillo proceso (imagen, puntos esenciales, datos de calibración). Después de los pertinentes ajustes se dota al conjunto de la cualidad (tono gris / paleta color), logrando la dualidad compacta (píxel/cualidad).

Las salidas idóneas son las denominadas SDI/DGN, que permiten el intercambio con otros sistemas, aunque también comparten modo los sistemas binarios. Tras la formación de fotolitos, las impresoras láser o los ploters electrostáticos o láser permiten una configuración gráfica final susceptible de expresión y de marcada vistosidad.



4. ACTIVIDADES FOTOGRAMÉTRICAS



4.1. ESQUEMA GENERAL

El flujo general de actividades para la ejecución de un levantamiento fotogramétrico queda representado en la siguiente figura.

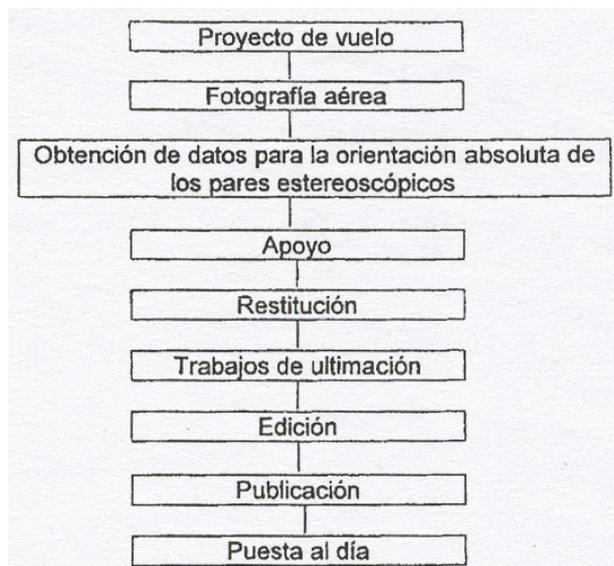


Figura Número 34.- Secuencia de actividades en la ejecución de un levantamiento fotogramétrico

En la actualidad, los vuelos fotogramétricos se realizan en formato digital, aunque las empresas de vuelo siguen reportando el formato positivo en color y blanco y negro, al margen del formato digital de las fotografías aéreas.

4.2. EL PROYECTO DE VUELO

Es importante resaltar desde un principio que la planificación y ejecución del vuelo son de tal importancia que es inútil pretender un buen resultado con un vuelo defectuoso. Por analogía con la topografía clásica, el vuelo sería la libreta de campo. En todo proyecto de vuelo hay que considerar una serie de aspectos no sólo geométricos, sino también relativos a las características fotográficas.

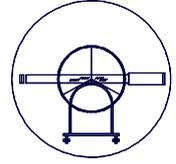
A.- Recubrimiento

El recubrimiento de las fotografías es de dos tipos:

- Recubrimiento longitudinal (p). Se mide en % y un valor muy utilizado es el de 60.
- Recubrimiento transversal (q). Se mide en % y un valor muy utilizado es el de 20.

Otros parámetros intervinientes son:

- l: longitud del formato de la fotografía
- E_F : denominador de la escala de la fotografía
- s: superficie relativa a una fotografía: $s = l^2$
- S: superficie de terreno de una fotografía: $S = E_F^2 s$



B.- El avance

El avance es la distancia entre dos puntos principales de dos fotografías consecutivas.

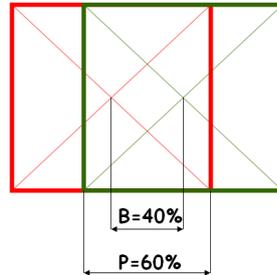


Figura Número 35.- Avance entre dos fotografías consecutivas

Expresado en tanto por ciento resulta (100-p), siendo su valor frecuente del 40%. Se suele denominar base y tiene por valor:

$$b = \frac{100 - p}{100} \cdot l$$

Tiene su correspondiente valor en el terreno y se obtiene introduciendo el cuantificador de la escala:

$$B = \frac{100 - p}{100} \cdot l \cdot E_F$$

C.- Separación entre pasadas

La separación entre pasadas es la distancia entre dos trayectorias paralelas consecutivas del avión protagonista del vuelo.



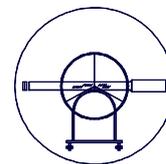
Figura Número 36.- Separación entre pasadas

Expresado en tanto por ciento resulta (100-q) y tiene por valor:

$$a = \frac{100 - q}{100} \cdot l$$

De igual forma tiene su correspondiente valor en el terreno y se obtiene introduciendo el cuantificador de la escala:

$$A = \frac{100 - q}{100} \cdot l \cdot E_F$$



D.- Superficie neta que cubre un fotograma

La superficie neta que cubre un fotograma vendrá definida por la expresión:

$$AB = \left[\frac{100-p}{100} \right] \cdot \left[\frac{100-q}{100} \right] \cdot (l \cdot E_F)^2$$

E.- Cadencia

Se denomina cadencia y se designa por I al intervalo de tiempo transcurrido entre dos disparos consecutivos:

$$I = \frac{B}{V}$$

siendo:

I: cadencia en segundos

B: base en metros

V: velocidad del avión en m/seg.

F.- Nitidez

Para que la nitidez sea adecuada, el desplazamiento de imagen no debe ser superior a 0,05 mm. Este dato fija el tiempo de obturación o exposición, en función de la velocidad del avión o viceversa.

$$\left. \begin{array}{l} \Delta d \leq 0,05 \text{ mm} \\ \Delta d = V \cdot t \end{array} \right\} t_{\max}^H = \frac{\Delta d}{V} = \frac{0,05 \cdot E_F}{V}$$

G.- Relación entre escala de mapa y escala de vuelo

Para evaluar la relación entre escalas se utiliza el ábaco definido a continuación.

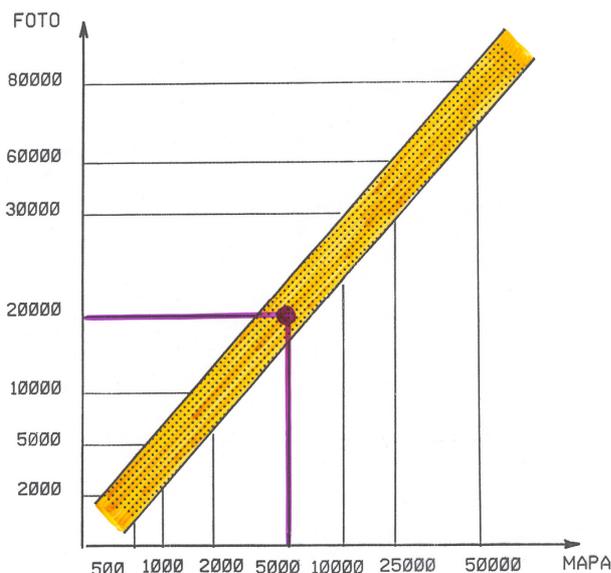
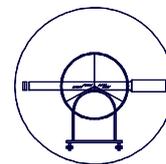


Figura Número 37.- Relación entre las escalas de mapa y de vuelo



Para trabajos habituales se tienen las siguientes relaciones:

PLANO	FOTOGRAFÍA
1/5000	1/20.000
	1/15.000
1/ 2.000	1/7.000
	1/5.000
1/ 1.000	1/5.000
1/500	1/3.500
	1/3.000

SUPUESTO PRÁCTICO

Se quiere realizar un levantamiento fotogramétrico a escala 1/5.000 de toda una hoja del MTN 1/50.000. Para ello se dispone de los siguientes datos:

- La cámara aérea tiene $f=150$ mm.
- El formato del fotograma es $l=23$ cm.
- El recubrimiento longitudinal es $p=60\%$
- El recubrimiento transversal es $q=20\%$
- La velocidad del avión es $V=200$ km/h

RESOLUCIÓN

- Escala de la fotografía:

$$\text{Gráfico Escalas} \Rightarrow E = \frac{1}{20.000} \Rightarrow E_F = 20.000$$

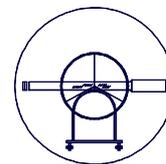
- Superficie de la zona:

Una hoja del MTN a escala 1/50.000 equivale aproximadamente a una extensión de 50.000 hectáreas, que puede asimilarse a un rectángulo de 27x18,5 km.

- Altura de vuelo:

$$\frac{1}{E_F} = \frac{f}{h} \quad h = f \cdot E_F = 0,150 \cdot 20.000 = 3.000 \text{ m.}$$

- Superficie de fotograma y de zona:



$$s = 0,23 \cdot 0,23 = 0,05m^2$$

$$S = 0,05 \cdot E_F^2 = 2.000Has.$$

- Base:

$$B = \frac{100-p}{100} \cdot l \cdot E_F = \frac{100-60}{100} \cdot 0,23 \cdot 20.000 = 1.840 m.$$

- Separación entre pasadas:

$$A = \frac{100-q}{100} \cdot l \cdot E_F = \frac{100-20}{100} \cdot 0,23 \cdot 20.000 = 3.680 m.$$

- Superficie neta por fotograma:

$$S = A \cdot B = 1840 \cdot 3680 = 677,12 Has.$$

- Número de fotografías:

$$n = \frac{50000}{677,12} = 74$$

- Número de fotografías por pasada:

$$N_f = 1 + \frac{27000}{1840} = 16$$

- Número de pasadas:

$$N_p = 1 + \frac{18500}{3680} = 6$$

4.3. APROXIMACIÓN DE COSTES

A.- Vuelo fotogramétrico

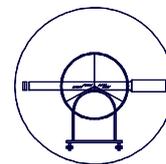
No es sencillo establecer, a priori y sin datos del propio vuelo, superficie, época del año, etc., un coste unitario para vuelos fotogramétricos, aunque como datos orientativos se pueden utilizar los valores de la siguiente tabla.

ESCALA DE VUELO	COSTE UNITARIO
1/15.000	0,20 / 0,25 €/Ha.
1/5.000	0,80 / 1,00 €/Ha.

B.- Apoyo fotogramétrico

Es variable y depende de la escala de la foto, de la orografía, detalles existentes, etc. Valores orientativos lo cifran en el siguiente entorno.

- . Punto de apoyo fotogramétrico: 30 €/Punto
- . Modelo de aerotriangulación: 30 €/Modelo



C.- Restitución fotogramétrica

También varía dependiendo de la empresa. El siguiente cuadro es orientativo e incluye la restitución numérica sobre sistemas analíticos, la edición cartográfica, toponimia, salida en soporte analógico y formatos DGN y DWG. (No incluye IVA).

ESCALA CARTOGRAFÍA	TIPO DE SUELO	ESCALA DE VUELO	PRECIO UNITARIO
Escala 1/500	Urbano	1/3.000	120,2 €/Ha.
	Semiurbano	1/3.500	60 €/Ha.
Escala 1/1.000	Urbano	1/4.000	45 €/Ha.
	Semiurbano	1/5.000	30 €/Ha.
Escala 1/2.000	Urbano	1/5.000	21 €/Ha.
	Semiurbano	1/8.000	15 €/Ha.
	Rústico	1/8.000	12 €/Ha.
Escala 1/5.000	Mixto	1/20.000	3 €/Ha.

SUPUESTO PRÁCTICO

La parte recubierta estereoscópicamente de una zona del Ayto. de Puente Viesgo se caracteriza por:

- 15% Urbano
- 35% Semiurbano
- 50% Rústico

De dicha zona se quiere realizar cartografía numérica sobre sistemas analíticos a escala 1/1.000 de la zona urbana y semiurbana. Para todos los efectos se considera que el pliego es el apropiado para estos cometidos, y que el apoyo continuo se realiza por Geodesia Espacial.

Se pide: Marcar los puntos de apoyo para apoyo continuo y establecer su coste aproximado. Obtener también el coste del vuelo y de la restitución.

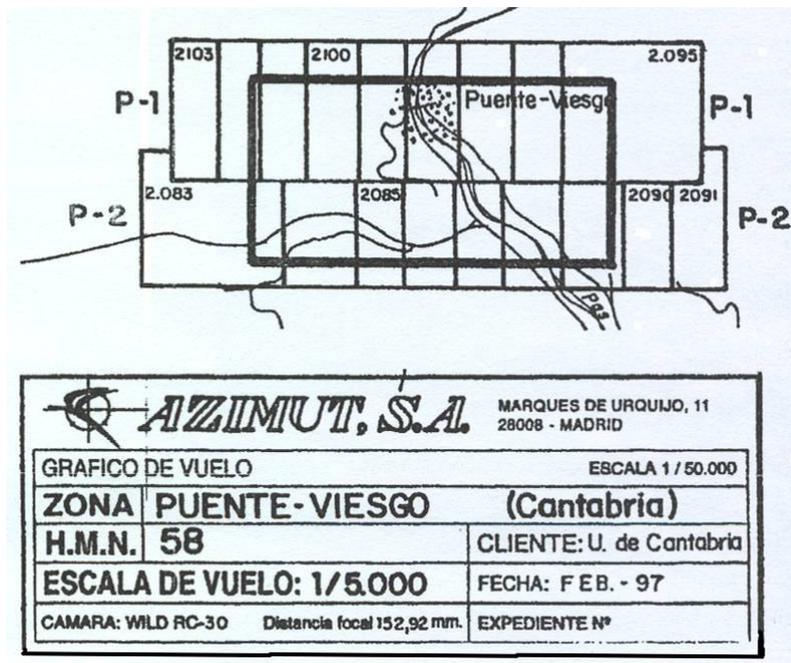
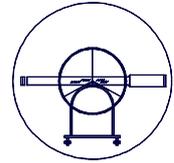


Figura Número 38.- Relación entre las escalas de mapa y de vuelo

RESOLUCIÓN

- Escala del gráfico:

Debido a la reducción realizada en la edición del texto, aunque el cajetín de vuelo marque que el gráfico de vuelo se encuentra a escala 1/50.000 esto no es así, por lo que en primera instancia se calcula la escala del gráfico para lo cuál se determina las dimensiones que tiene el fotograma en verdadera magnitud.

$$L = 0,23 \cdot E_F = 0,23 \cdot 5.000 = 1.150 \text{ m.}$$

A continuación se puede determinar la escala del gráfico sabiendo que el gráfico de vuelo las dimensiones del fotograma, 18 mm., equivalen a 1.150 m. con lo que la escala del gráfico se puede obtener definitivamente.

$$E_{\text{gráfico}} = \frac{1.150}{0,018} = 63.889 \Rightarrow 1/63.889$$

- Apoyo fotogramétrico:

En el caso de llevar a cabo apoyo fotogramétrico continuo se necesitan 25 puntos de apoyo, tal y como se representa en la siguiente figura.

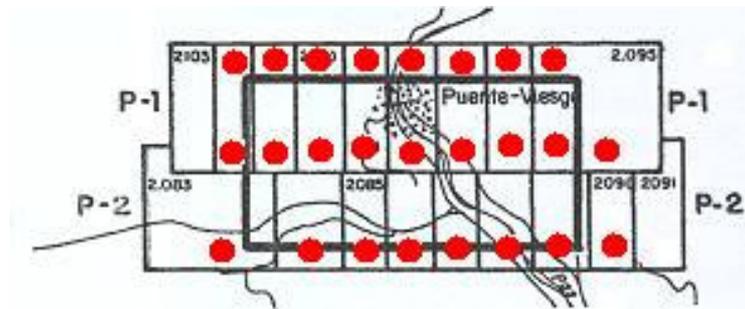
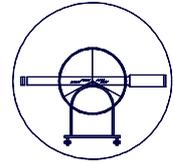


Figura Número 39.- Puntos necesarios en apoyo continuo

Con lo que el coste se calcula multiplicando el número de puntos por el precio unitario del punto de apoyo

$$\text{Coste} = 25 \cdot 30 = 750 \text{€}.$$

En el caso de llevar a cabo apoyo fotogramétrico aerotriangulado se necesitan 9 puntos de apoyo y 4 modelos, tal y como se representa en la siguiente figura.

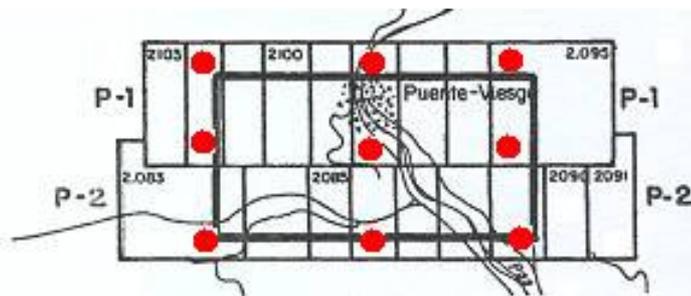


Figura Número 40.- Puntos y modelos necesarios en apoyo aerotriangulado

Con lo que el coste se calcula multiplicando el número de puntos por el precio unitario del punto de apoyo y añadiendo el coste de de los modelos que se obtiene de forma similar

$$\text{Coste} = 30 (9 + 4) = 390 \text{€}.$$

- Coste del vuelo:

Para calcular el coste del vuelo fotogramétrico hay que calcular en primera instancia la superficie a volar, para ello se hace necesario determinar la zona objeto de vuelo tal y como se puede apreciar en el gráfico de vuelo.

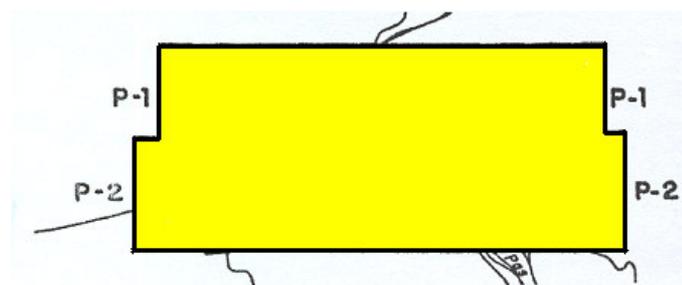
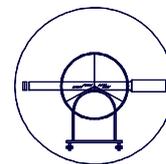


Figura Número 41.- Superficie volada



Determinada la zona volada, calcular la superficie es sencillo ya que se conoce la escala del gráfico de vuelo.

$$S_{REAL} = S_{PAPEL} \cdot E_{gráfico}^2 = \frac{22 \cdot 63.889^2}{10^8} \cong 900 \text{ Ha.}$$

Con lo que aplicando el coste unitario del vuelo se determina el coste del vuelo fotogramétrico, al que se le añade una cantidad (2.000 €) que las empresas de vuelo suelen cobrar por desplazar el avión a la zona objeto de vuelo.

$$\text{Coste} = 2.000 + (3 \cdot 900) = 4.700 \text{ €}$$

- Coste de la restitución:

Para calcular el coste de la restitución hay que calcular en primera instancia la superficie a restituir, para ello se hace necesario determinar la zona objeto de restitución tal y como se puede apreciar en el gráfico de vuelo.

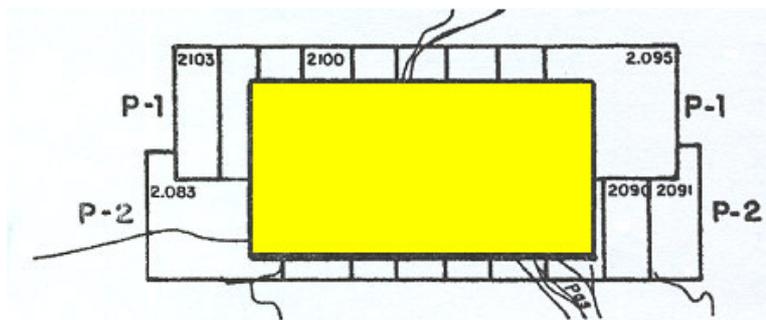


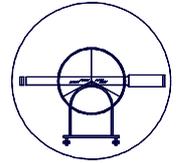
Figura Número 42.- Superficie objeto de restitución

Determinada la zona a restituir, calcular la superficie es sencillo ya que se conoce la escala del gráfico de vuelo.

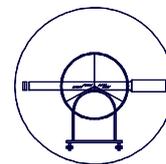
$$S_{REAL} = S_{PAPEL} \cdot E_{gráfico}^2 = \frac{11 \cdot 63.889^2}{10^8} \cong 450 \text{ Ha.}$$

Con lo que aplicando el coste unitario por cada tipo de suelo se determina el coste de la restitución.

$$\text{Coste} = [450 \cdot 0,15 \cdot 45] + [450 \cdot 0,35 \cdot 30] + [450 \cdot 0,50 \cdot 15] = 11.137,50 \text{ €}$$



5. FOTOGRAMETRÍA TERRESTRE CON CÁMARAS MÉTRICAS



5.1. INTRODUCCIÓN

La fotogrametría terrestre, nació paralelamente con la fotografía. Esta técnica permite capturar la información de un determinado objeto de forma completa, estable y rápida y tras resolver el problema geométrico derivado, obtener la información geométrica del mismo.

Laussedat fue el primero en construir cámaras especiales y en levantar planos mediante esta técnica que comenzó denominándose “metrofotografía”, a mediados del siglo XIX. Pero el gran impulsor de la denominada fotogrametría terrestre fue Alberto Meydenbauer, ingeniero y arquitecto alemán nacido en 1.834. Tras finalizar sus estudios en Berlín se dedicó a restaurar la catedral de Wetzlar y a desarrollar su profesión en la sección de ferrocarriles (en la etapa de construcción de los primeros caminos de hierro). En 1.855 fue nombrado Consejero de Arquitectura y comenzó su etapa para tomar datos fotogramétricos de los monumentos. De esta forma y con una cámara métrica construida por él mismo hacia 1.865 se efectuaron las primeras pruebas, y aunque al inicio los resultados no fueron buenos, el término “fotogrametría” quedó completamente acuñado.

Toda esta valiosa información se salvó de la destrucción ocasionada durante la segunda guerra mundial, y una vez duplicados los negativos a formato cómodo de 18x18 cm. (el material original eran placas de vidrio de 40x40 cm. de tamaño) fue posible restaurar parte del patrimonio arquitectónico nacional de la antigua República Democrática Alemana, recuperando las formas y la métrica de los primitivos monumentos.

5.2. LA TOMA FOTOGRÁFICA

En la actualidad la toma fotográfica se puede realizar de tres formas diferentes, dependiendo del tipo de cámara:

- Cámaras estereométricas: se trata de dos cámaras métricas idénticas, situadas en un soporte común y separadas una distancia fija. No se emplean, como tales, en la actualidad, sino como independientes.
- Cámaras métricas: son cámaras independientes, versátiles y de elevado coste. La focal varía entre 60 y 100 milímetros y los formatos que más se utilizan están comprendidos entre 60, 80 milímetros el lado menor y 80, 100 milímetros el lado mayor.
- Cámaras semimétricas: son cámaras casi convencionales, con elementos que las diferencian, que permiten unas buenas prestaciones en comparación con su coste y con el proceso que necesitan.

Una vez definido el objeto de la toma fotográfica, se estudia la ubicación de la cámara frente al objeto. En la siguiente figura se puede apreciar la posición de la cámara métrica en el caso más simple de una toma estereoscópica simple, es decir, una toma desde dos puntos diferentes (objeto pequeño, aunque muy habitual). En la mencionada figura se puede constatar que definida la cámara existen dos parámetros de extraordinaria importancia (parámetros de diseño): distancia desde el objeto a la cámara y la separación entre las cámaras.

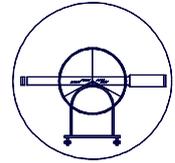


Figura Número 43.- Frente, planta y alzado de una toma simple

Si el objeto es grande se realizan más tomas de similares características y en ocasiones se realiza una multi-toma que finaliza en una selección final de instantáneas.

En muchas ocasiones, el objeto se suele señalar con mini-prismas planos, que son paneles autoadhesivos de diferentes tamaños (30x30 / 50x50 / ... mm.), que se reparten por el objeto y tienen como finalidad configurar la red de puntos de apoyo para la siguiente etapa, aunque el apoyo también puede realizarse con estación topográfica de forma sencilla.

5.3. PRINCIPALES RELACIONES DE SEMEJANZA

Entre el objeto y la fotografía (el negativo, en una primera aproximación) existen relaciones de semejanza. Considerando unos ejes de referencia x, z en la foto y X, Z en el objeto y designando profundidad la dimensión en el tercer eje, y (Y) se pueden establecer, por similitud con las fotografías de eje vertical, las siguientes relaciones:

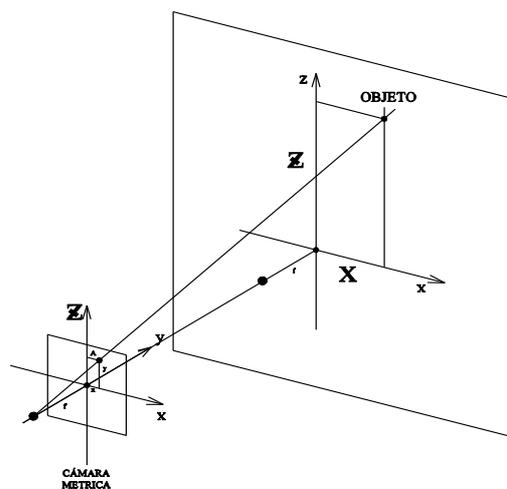
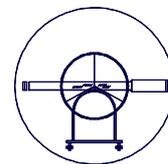


Figura Número 44.- Semejanza en un fotograma



Sea un detalle A incluido en el objeto localizado en el fotograma. La relación de semejanza queda establecida de la siguiente forma:

$$\frac{f}{Y} = \frac{x}{X} \rightarrow X = \frac{Y}{f} x$$

$$\frac{f}{Y} = \frac{z}{Z} \rightarrow Z = \frac{Y}{f} z$$

Además de las fotocoordenadas (x,y) intervienen las coordenadas del objeto (X,Z), la focal de la cámara métrica (f) y su correspondiente distancia denominada profundidad, Y. Para establecer la vinculación de la profundidad Y resulta necesario utilizar el par fotogramétrico.

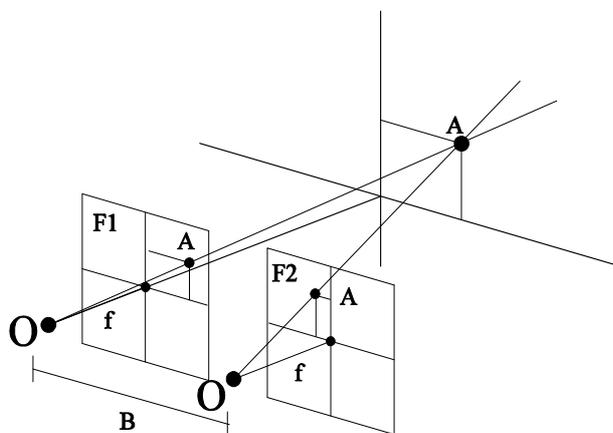


Figura Número 45.- Semejanza en un par fotogramétrico

Sean los fotogramas F_1 y F_2 las que configuran el par fotogramétrico de un determinado objeto. En la figura quedan marcados los principales elementos protagonistas: detalle a considerar, A en las fotografías y en el objeto, el punto principal, la focal de la cámara e, implícitamente, las fotocoordenadas de las tomas del objeto y la profundidad:

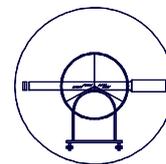
- Fotocoordenadas del detalle A (objeto): $(x_{AZA})_{F1}$, $(x_{AZA})_{F2}$.
- Coordenadas de A (objeto): $X_A Z_A$.
- Profundidad de A (tercera dimensión de un punto del objeto): Y_A .

A partir de la fotografía se puede establecer:

$$\frac{f}{y_A} = \frac{P_A}{B}$$

siendo B la base de la toma (distancia entre la posición de las tomas) y P_A el paralaje del punto considerado del objeto (movimiento aparente que ha sufrido el punto considerado al pasar de la fotografía F_1 a la fotografía F_2), resultando:

$$Y_A = \frac{B \cdot f}{P_A}$$



Para todos los puntos del objeto B y f permanecen constantes, resultando lineal la variación de Y_A con relación al paralaje evaluado.

SUPUESTO PRÁCTICO

Una cámara métrica de focal $f=120$ mm. y formato 60×80 mm. realiza un par fotogramétrico a un objeto con base fotogramétrica de 4 m. Sabiendo que las fotocoodenadas son:

Foto izquierda: FI

$$x_A = 26 \text{ mm.} \quad y_A = 39 \text{ mm.}$$

Foto derecha: FD

$$x_A = -22 \text{ mm.} \quad y_A = 39 \text{ mm.}$$

Determinar las coordenadas del punto A.

RESOLUCIÓN

$$Y_A = \frac{B \cdot f}{P_A} = \frac{4 \cdot 120}{(26 + 22)} = 10m.$$

$$X_A = \frac{x_A}{f} \cdot Y_A = \frac{26}{120} \cdot 10 = 2,167m.$$

$$Z_A = \frac{z_A}{f} \cdot Y_A = \frac{37}{120} \cdot 10 = 3,083m.$$

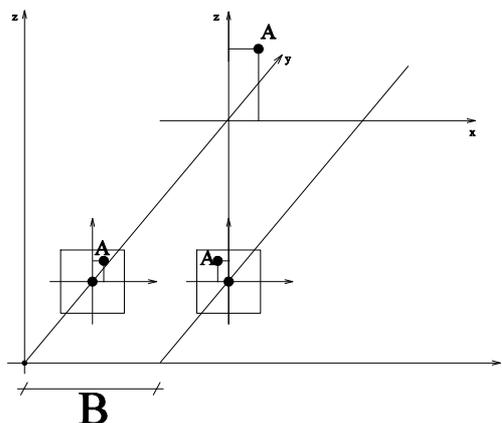
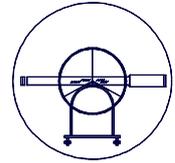


Figura Número 46.- Aplicación concreta

5.4. EVALUACIÓN DE ERRORES Y SU INFLUENCIA PARA PROYECTAR TOMAS FOTOGRÁFICAS

De las relaciones anteriormente establecidas se obtienen las siguientes igualdades:

- a) Para la coordenada X del objeto:



$$X = \frac{Y}{f} x$$

$$LX = LY + Lx - Lf \rightarrow \frac{dX}{X} = \frac{dY}{Y} + \frac{dx}{x} - \frac{df}{f}$$

De donde resulta:

$$dX = \frac{X}{Y} dY = \frac{x}{f} dY$$

b) Para la coordenada Z, por igual razonamiento:

$$dZ = \frac{z}{f} dY$$

c) Para la coordenada Y. Partiendo del concepto genérico del paralaje y diferenciando resulta:

$$P = \frac{B \cdot f}{Y}; \quad dP = -\frac{B \cdot f}{Y^2} dY$$

$$dY = -\frac{Y^2}{Bf} dP$$

Definidas estas expresiones, se puede escribir:

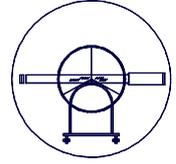
$$dX = -\frac{x}{f} \frac{Y^2}{Bf} dP = -\frac{x}{B} \frac{Y^2}{f^2} dP$$

$$dY = -\frac{Y^2}{B \cdot f} dP$$

$$dZ = -\frac{y}{f} \frac{Y^2}{B \cdot f} dP = -\frac{y}{B} \frac{Y^2}{f^2} dP$$

A partir de estas expresiones ya se pueden determinar los errores máximos que dependen de la cámara métrica (focal y formato), de su posición relativa en las tomas (base fotogramétrica) y del instrumento que realice las medidas del paralaje (restituidor analítico). Los máximos valores de las fotocoordenadas están situados en el punto extremo del fotograma, es decir cuando $\frac{x}{2}$ e $\frac{y}{2}$ agotan las dimensiones del formato. En esta circunstancia, desde el centro óptico de la cámara quedan determinados dos ángulos límites:

$$\operatorname{tg} \frac{\omega}{2} = \frac{\frac{x_L}{2}}{f}$$



$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{y_L}{f}$$

siendo x_L e y_L el tamaño del formato horizontal y vertical del negativo existente en la cámara métrica.

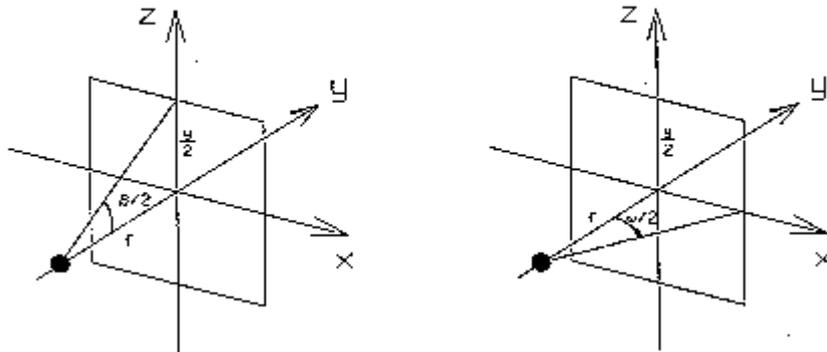


Figura Número 47.- Dimensiones límite en un fotograma

SUPUESTO PRÁCTICO

Determinar el error máximo en una toma simple, a partir de los siguientes datos:

- . Formato foto 80x100 mm.
- . Focal: 75 mm.
- . Base fija: 40 cm.
- . Error en obtener paralaje: 10 micras (0,01 mm.).
- . Distancia de la toma: 9 m.

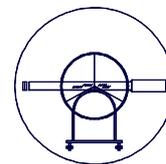
RESOLUCIÓN

Directamente se pueden obtener los siguientes resultados:

$$dY = \frac{Y^2}{Bf} dP = \frac{9^2}{0,4 \cdot 0,075} 10^{-5} = 0,027m.$$

$$dX = \operatorname{tg} \left(\frac{\omega}{2} \right) dY = \frac{x/2}{f} dY = \frac{80/2}{75} 0,027 = 0,0144m.$$

$$dZ = \operatorname{tg} \left(\frac{\beta}{2} \right) dY = \frac{y/2}{f} dY = \frac{100/2}{75} 0,027 = 0,018m.$$



Pudiendo discretizar el error planimérico, que en el presente caso es “error de fachada” (en el plano vertical) y el error altimétrico que es de “profundidad”, ambas, en su contexto de máximo.

$$\varepsilon_{fachada}^2 = dX^2 + dY^2 = tg^2 \frac{\omega}{2} \frac{Y^2}{B \cdot f} dP + tg^2 \frac{\beta}{2} \frac{Y^2}{B \cdot f} dP$$

$$\varepsilon_{fachada} = \frac{Y^2}{B \cdot f} dP \sqrt{tg^2 \frac{\omega}{2} + tg^2 \frac{\beta}{2}}$$

$$\varepsilon_{profundidad} = \frac{Y^2}{B \cdot f} dP$$

En el ejemplo propuesto se puede demostrar que los máximos errores son:

$$\varepsilon_{fachada} = 0,023 \text{ m.}$$

$$\varepsilon_{profundidad} = 0,027 \text{ m.}$$

5.5. APLICACIONES CARACTERIZADAS

5.5.1. CATEDRAL DE CALAHORRA

La puerta de San Jerónimo fue objeto de un levantamiento por fotogrametría terrestre utilizando un total de veintidós puntos de apoyo mitad micropismas, que fueron colocados antes de la toma fotográfica, mitad puntos significativos que existían en el objeto. Para establecer las coordenadas de esos puntos de apoyo se utilizó la estación topográfica total TC-2000 de Wild y metodologías topográficas combinadas: radiación, intersección directa y nivelación trigonométrica.



Figura Número 48.- Cámara métrica y objeto del levantamiento

La restitución se realizó con el restituidor analítico Planicom P-3 de Zeiss, obteniéndose el siguiente resultado:

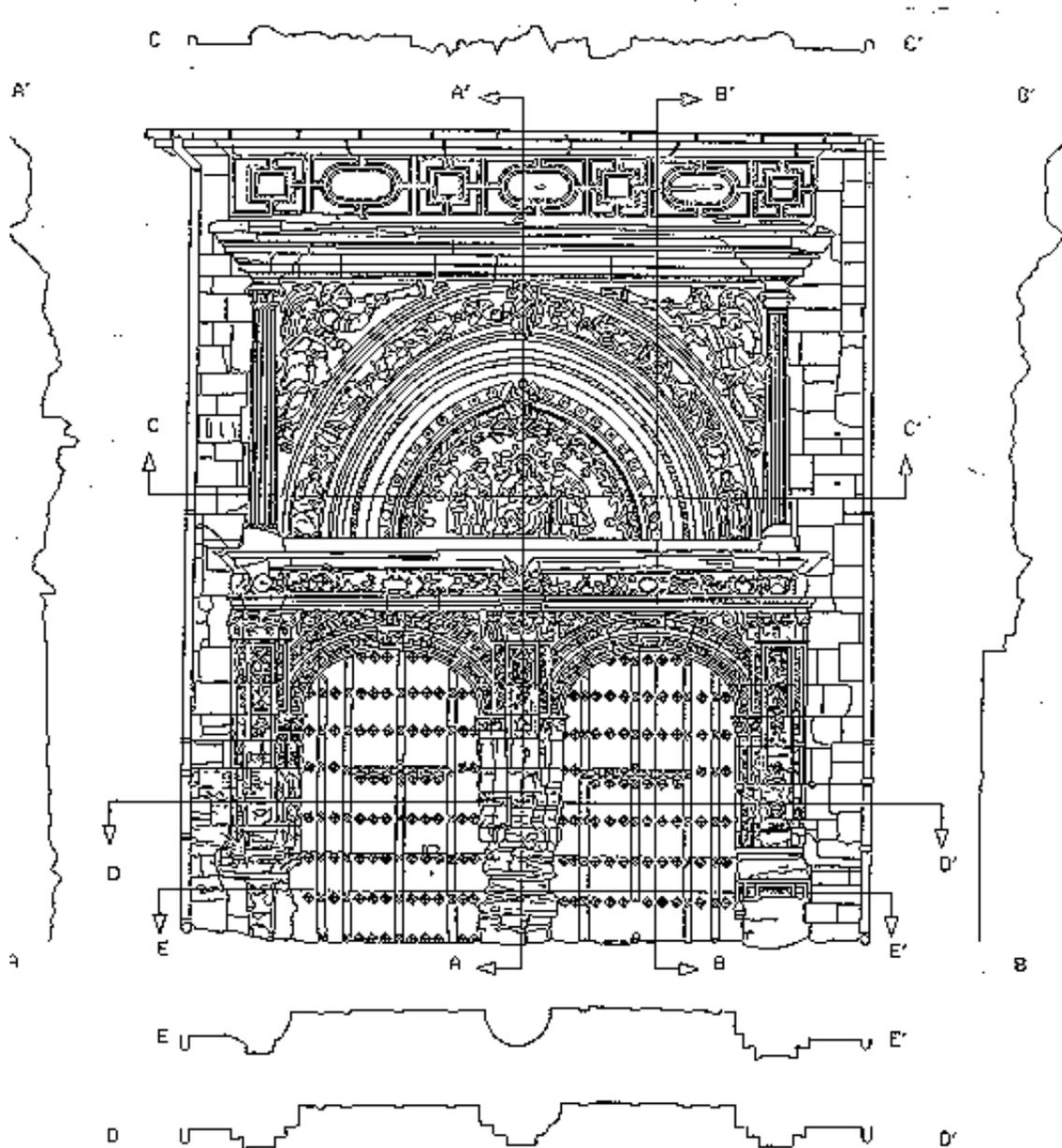
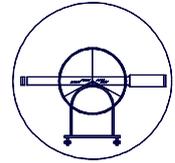


Figura Número 49.- Resultado e información

5.5.2. IGLESIA DE LOS JESUITAS (SANTANDER)

Esta iglesia, situada en un espacio confinado de la ciudad, se caracteriza por tener cinco lienzos independientes: dos fachadas amplias y las tres que definen la torre. La toma fotográfica fue muy dificultosa y no se preseñalaron los lienzos. El apoyo se realizó mediante intersección y nivelación trigonométrica, utilizando una estación topográfica total de grandes prestaciones (TC-2000 de Wild).

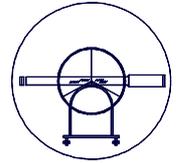


Figura Número 50.- Toma fotogramétrica de un lienzo

La restitución se realizó con el restituidor analítico Planicom P-3 de Zeiss.



Figura Número 51.- Caracterización cartográfica de dos lienzos